



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

**A Study on the Efficient Framework and  
Methodology for Quantifying the Risk  
in the Process Industry**

공정산업의 위험 정량화를 위한 효율적 체계 및  
방법론에 관한 연구

2012년 8월

서울대학교 대학원

화학생물공학부

윤 익 근



# A Study on the Efficient Framework and Methodology for Quantifying the Risk in the Process Industry

공정산업의 위험 정량화를 위한 효율적 체계 및 방법론에 관한 연구

지도교수 윤 인 섭

이 논문을 공학박사학위논문으로 제출함

2012년 8월

서울대학교 대학원

화학생명공학부

윤익근

윤익근의 박사학위논문을 인준함

2012년 08월

위 원 장

金 和 鎔 (인)

부 위 원 장

尹 宗 燮 (인)

위

원

韓 宗 勳 (인)

위

원

吳 信 奎 (인)

위

원

高 在 旭 (인)





# 요 약 문

## 공정산업의 위험 정량화를 위한 효율적 체계 및 방법론에 관한 연구

윤 익 근(2007-30273)

서울대학교 화학생물공학과 대학원

석유, 가스 및 화학 공정산업은 인류에게 편리성과 더불어 사고 발생시 근로자, 인접 주민 및 환경 등에 막대한 피해를 줄 수 있는 위험성을 동시에 부가하는 양면성을 가지고 있으며 역사적 사건들은 이를 증명하고 있다. 이로 인해 전 세계적으로 위험성 평가 및 위험관리에 관한 규제 및 코드/표준들이 끊임없이 생성, 적용되고 있으며 그것들의 핵심적 철학은 순환적 위험 분석 및 실행을 통해 위험을 지속적으로 통제토록 한다는 것이다.

위험성 평가는 크게 두 가지로 분류되며 그 하나는 위험의 확인에 주로 초점을 두는 정성적 위험성 평가이고 또 다른 하나는 규정한 위험을 확률적으로 계산하는 정량적 위험성 평가(QRA)이다. 각각의 방법은 고유의 역할과 장단점이 있고 통상적으로 QRA는 정성적 평가에 이어 수행이 된다.

최근 안전 규제기관과 공정 산업계에서는 정량적 위험성 평가의 활용도가 점차 커지고 있다. 그 이유는 산업의 팽창과 인구증가로 인한 건설 부지의 부족, 공사 및 운영 비용 한계 등과 같은 여러 가지 제약들로 인해

안전성과 생산성의 상관관계가 더욱 복잡해져 안전의사 결정시 계량적 위험도 산출이 절대적으로 필요하기 때문이다.

하지만 이러한 필요성과 기술적 동향에 의해 최근 20년간 다양한 정량 위험 분석 모델이 개발되고 많은 국가에 관련 규제가 도입, 적용되고 있음에도 불구하고 위험관리 프로세스에서 QRA를 효율적으로 추진키 위한 관리적, 실행적 차원에서의 체계(모델)는 아직 제시된 바가 없어 그것을 활성화하는 데 있어서는 한계에 도달했다.

본 논문에서는 이러한 상황을 극복하기 위하여 위험관리에 있어 정량적 위험 분석을 지속적 도구로 포용하기 위한 목적 특성을 3가지로 규정하고 그것을 달성할 수 있는 체계에 관하여 연구하였다. 달성코자 하는 3가지 특성은 협력성(분업성)과 위험 분석 모델의 검토성과 연속성의 실현이다. 이를 위해 본 논문에서는 ARHSP(Accidental Release Hazard Scenario Point)라고 하는 구심점 기반의 위험성 평가를 제안하였다. 이것은 정량 위험 분석 과정의 중간 산출물인 중요 사고경위를 중심으로 사고결과 분석 이론과 통합하여 확률적 해석을 완료하는 체계론적 접근법이다. ARHSP는 사고에 관한 중요 사건들에 대한 정보를 담고 있어 비전문가, 즉 이해관계자들의 위험 분석에 대한 이해를 돕고 각 기본사건들의 확률을 쉽게 얻기 위한 분업화 체계를 가짐으로서 효율적 QRA를 추구한다. 이런 체계를 기반으로 하여 공정의 초기설계단계부터 운영단계까지 위험 분석 정보를 축적하고 공유할 뿐만 아니라 발전시켜나갈 수 있는 정량적 위험관리 프로세스 모델을 제시하였다. 그리고 그것을 실현할 수 있는 구체적인 QRA 시스템 구조와 분석 절차를 설계하고 작성하였다.

또한 본 논문에서는 2개의 사례 연구를 통하여 제안한 방법에 기반한 QRA 시스템을 구축하고 실제 산업의 안전관리에 적용한 결과를 보임으로서 그 유효성을 실증하였다. 사례연구1에서는 가스 공급시설에 대한 웹

기반의 QRA 시스템을 구축하고 적용하였는데 백여개 이상의 시설들에 대하여 전문가와 안전관리자가 분업적 협력을 통해 분석 시간을 기존 방법에 비해 획기적으로 줄임으로서 제안한 방법이 매우 효율적임을 입증하였다. 사례연구2에서는 보다 유연한 ARHSP 작성 기능을 가진 일반화된 QRA 시스템을 구축하고 LNG 시설에 적용하였다. 그리고 더 나아가 이미 적용된 ARHSP를 쉽게 개선하고 응용한 결과를 보임으로서 제안한 방법이 QRA 연속성과 이해성의 실현을 가능케 하는 매우 실용적인 체계임을 확인하였다.

결론적으로 본 논문은 기존 QRA 수행과정, 즉 위험요소 확인, 모델 수립, 데이터 설정, 위험도 해석 과정에 있어 대부분을 전문가에 의존했던 기존 체계를 탈피하고 협력적 체계로 분석을 효율적으로 수행할 수 있는 새로운 방법을 보여주었다. 이로 인해 국가나 기업에서 QRA를 보다 쉽게 적용할 수 있는 새로운 기틀(패러다임)을 마련하였다. 또한 위험관리 프로세스에서 가장 핵심 철학인 모든 관련자의 위험 분석 및 실행 참여를 가능케 하는 실용적 모델을 제시함으로써 QRA 규제/표준 수립 및 그 활성화와 응용 시스템 발전에 기여하였다. 마지막으로 공정산업에서 QRA를 통해 근로자 및 국민의 안전성을 담보하고 합리적 의사 결정을 이룰 수 있는 위험 기반 관리 기술 확산에 기여하였다.

키워드 : 정량적 위험성 평가, ARHSP(Accidental Release Hazard Scenario Point), 위험관리 프로세스, 사고빈도 분석, 사고결과 및 영향 분석



## <제 목 차 례>

요약문 .....	i
그림차례 .....	viii
표 차례 .....	xi
<b>1. 서 론 .....</b>	<b>1</b>
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 및 범위 .....	7
1.3 논문의 구성 .....	9
<b>2. 공정 산업에 대한 위험성 평가 .....</b>	<b>12</b>
2.1 정성적 위험성 평가 개론 .....	13
2.2 정량적 위험성 평가 절차 및 방법론 고찰 .....	20
2.2.1 QRA 목적 수립 및 위험요소 확인 .....	25
2.2.2 누출 사고 생성 및 선택 .....	25
2.2.3 사고빈도 분석 .....	28
2.2.4 사고결과 분석 .....	40
2.2.5 위험(도)의 표현 및 기준 .....	43
<b>3. 정량적 위험성 평가 적용/연구 현황 및 문제점 .....</b>	<b>55</b>
3.1 공정산업에서 물질 위험요소의 중요성 .....	55
3.2 QRA 적용 및 연구 현황 .....	61
3.3 기존 위험 정량화 방법 및 체계의 문제점 .....	74
<b>4. 제안하는 방법론 .....</b>	<b>77</b>
4.1 기본 아이디어 .....	77
4.2 ARHSP 제안 기반 논리 .....	83

4.3 ARHSP 내부 수식 구성 .....	86
4.3.1 질의들 및 기본 사건 확률 부분 .....	87
4.3.2 사고 경위 및 빈도 계산 부분 .....	92
4.3.3 최종 사고 시나리오 및 빈도 부분 .....	93
4.4 사고결과 및 위험도 분석 흐름도 .....	94
4.5 정량적 위험관리 프로세스 모델 .....	98
4.6 ARHSP 기반 연속적 정량 위험 분석 실현 .....	101
<b>5. ARHSP 기반 QRA 시스템 플랫폼 및 분석 절차 .....</b>	<b>104</b>
5.1 QRA 시스템 플랫폼 구조 .....	104
5.2 ARHSP 시스템적 세부 구조 .....	108
5.3 ARHSP 작성 흐름도 .....	112
5.3.1 하나의 누출 시나리오를 포함한 ARHSP 작성 흐름도 .....	114
5.3.2 두개 이상의 누출 시나리오를 포함한 ARHSP 작성 흐름도 .....	116
5.3.3 사고결과 분석 ARHSP 개선 작성 흐름도 .....	118
5.4 제안한 QRA 플랫폼에 기반한 위험성 평가 절차 .....	121
5.4.1 초기 설계 단계에서의 분석 절차 .....	123
5.4.2 상세 설계 단계에서의 분석 절차 .....	126
5.4.3 설비 운영 단계에서의 분석 절차 .....	129
<b>6. 사례 연구 .....</b>	<b>132</b>
6.1 사례 1 : 가스시설에 대한 웹기반 QRA 시스템 구축과 적용 .....	134
6.1.1 적용 개요 .....	134
6.1.2 천연가스 공급시설에 대한 이해와 ARHSP 작성 사전 준비 .....	136
6.1.3 가스 공급시설에 대한 QRA 시스템 구축 .....	144
6.1.4 개발 시스템 적용과 고찰 .....	149
6.2 사례 2 : 유연한 ARHSP 기능을 가진 웹기반 LNG 플랜트 정량적 위험성 평가 시스템 구축과 적용 .....	152

6.2.1 적용 개요 .....	152
6.2.2 LNG 인수시설에 대한 이해와 ARHSP 작성 사전 준비 .....	153
6.2.3 시스템 구축과 적용 .....	161
6.2.4 활용 및 고찰 .....	169
<b>7. 결론 및 제안사항 .....</b>	<b>172</b>
7.1 결론 및 기여 .....	172
7.2 제안 사항 .....	178
<b>참고문헌 .....</b>	<b>181</b>
<b>영문 요약서 .....</b>	<b>192</b>



## <그림 차례>

Figure 1-1. 전반적인 위험성 평가 절차 .....	2
Figure 1-2. 위험관리 체계 .....	6
Figure 2-1 시나리오 기반 정성적 위험성 평가 연구(적용)의 일반적 절차 .....	15
Figure 2-2 정성적 위험성 평가 기법 개요 및 분석기록지 체계 .....	16
Figure 2-3 HAZOP 세부 분석 절차 .....	18
Figure 2-4 정량적 위험성 평가 기법 분류별 필요 정보 및 결과 .....	23
Figure 2-5 정량적 위험 분석의 일반적 절차 .....	24
Figure 2-6 QRA 분석 대상 사고 목록 선정 절차 .....	26
Figure 2-7 모델을 이용한 사고빈도 분석의 절차 .....	29
Figure 2-8 사고빈도 분석과 사고결과 분석의 경계 예 .....	35
Figure 2-9 위험물질의 누출로 인한 사고결과/영향 분석 모델 흐름도 .....	42
Figure 2-10 정량적 위험도 기준의 일반적 구성 .....	48
Figure 2-11 영국 사회적 위험도 기준 .....	52
Figure 2-12 네덜란드 사회적 위험도 기준 .....	52
Figure 2-13 체코 사회적 위험도 기준 .....	53
Figure 2-14 홍콩 사회적 위험도 기준 .....	53
Figure 2-15 한국 가스안전공사 사회적 위험도 기준 .....	54
Figure 3-1 연도별 중대재해 중 사망 사고 건수 변화 .....	56
Figure 3-2 한국 글로벌 EPC 기업의 (Full) QRA 적용 비율 조사 결과 .....	62
Figure 3-3 공정산업 위험성 평가 연구 방법론 비율 .....	68
Figure 3-4 위험성 평가 방법론 분류별/연도별 연구 논문 개수 .....	69
Figure 3-5 기존 (Full) QRA 시스템을 이용한 분석 흐름도 .....	73
Figure 4-1 구심점 개요 .....	78
Figure 4-2 구심점(ARHSP) 완성을 통한 분석 개요 .....	81
Figure 4-3 ARHSP를 이용한 QRA 분석 기본 체계 .....	82
Figure 4-4 사고빈도 분석에 관한 이해관계자 역할과 패러미터 설정 배분에 대한	

개요 .....	84
Figure 4-5 사고빈도 분석 흐름의 변경 .....	85
Figure 4-6 ARHSP 내부 항목 구조 및 연관 개요 .....	86
Figure 4-7 ARHSP 내부 기본사상 확률 계산 체계 .....	87
Figure 4-8 ARHSP 내부 질의 작성과 기본사건 확률식 수립 예제 .....	91
Figure 4-9 ARHSP 내부 사고경위 및 빈도 계산 체계 .....	92
Figure 4-10 ARHSP 내부 최종 사고빈도 계산 체계 .....	93
Figure 4-11 ARHSP 연계 위험 분석 체계 .....	94
Figure 4-12 ARHSP 연계 위험도 계산 수식 흐름도 .....	95
Figure 4-13 ARHSP를 이용한 위험 정량화 전체 흐름도 .....	97
Figure 4-14 제안하는 정량적 위험관리 프로세스 모델 .....	100
Figure 4-15 연속적 QRA 성능 발전 .....	103
Figure 5-1 제안하는 QRA 시스템 플랫폼 기본 구조 .....	105
Figure 5-2 QRA 시스템 내부 모듈 상세 구성도 .....	106
Figure 5-3 제안하는 ARHSP 내부 설계안 .....	111
Figure 5-4 ARHSP 작성 전 준비 정보 개요 .....	112
Figure 5-5 ARHSP 작성을 위한 준비 정보 개요 예시 .....	113
Figure 5-6 하나의 누출 시나리오에 대한 ARHSP 작성 흐름도 .....	115
Figure 5-7 2개 이상의 누출 시나리오를 가진 ARHSP 작성 흐름도 .....	117
Figure 5-8 사고결과 분석만을 위한 ARHSP 작성 흐름도 .....	118
Figure 5-9 사고결과 분석 ARHSP 개선 작성 흐름도 .....	120
Figure 5-10 ARHSP 기반 정량적 위험성 평가 연구 일반적 절차 .....	122
Figure 5-11 초기 설계 단계에서의 위험성 평가 절차 및 구성 .....	125
Figure 5-12 상세 설계 단계에서의 위험성 평가 절차 및 구성 .....	128
Figure 5-13 운영 단계에서의 위험성 평가 절차 및 구성 .....	131
Figure 6-1 가스공급시설의 프로세스 구성도 .....	135
Figure 6-2 가스시설에 대한 ARHSP 작성 과정 .....	138
Figure 6-3 정압설비 압력상승 고장모드로 인한 대누출 사고 fault tree 작성 모	

텔 예시 .....	141
Figure 6-4 정압설비 대누출 사고경위 및 관련 기본사상들 .....	142
Figure 6-5 개발한 가스 공급 시설에 대한 QRA 시스템 구조 개요도 .....	144
Figure 6-6 가스설비 QRA에 적용한 점화확률 .....	145
Figure 6-7 구축한 가스시설에 대한 QRA 시스템 메인 관리 모듈 .....	146
Figure 6-8 구축한 가스시설에 대한 QRA 분석 정보 입력 및 결과 모듈 .....	148
Figure 6-9 LNG 인수기지 설비 공정 개요도 .....	152
Figure 6-10 LNG 선 이탈로 인한 누출 사고 fault tree 작성 예 .....	156
Figure 6-11 탱크 인출입 라인에서 누출 사고 fault tree 작성 예 .....	156
Figure 6-12 LNG 탱크 지붕 파손에 대한 fault tree 작성 예 .....	157
Figure 6-13 웹기반 LNG 플랜트 QRA 시스템 구조 개요도 .....	162
Figure 6-14 개발된 ARHSP 작성 모듈 .....	164
Figure 6-15 ARHSP 관리 모듈 .....	165
Figure 6-16 기본 고장률 관리 모듈 .....	165
Figure 6-17 ARHSP 배치 및 분석 정보 설정 모듈 .....	166
Figure 6-18 사고결과 및 영향 분석 결과 화면 예 .....	167
Figure 6-19 정량적 위험도 분석 결과 화면 예 .....	168
Figure 6-20 FSRU와 하역설비, 탱크설비 배치 2개안 .....	169
Figure 6-21 1안에 대한 QRA 결과 .....	170
Figure 6-22 2안에 대한 QRA 결과 .....	171
Figure 7-1 제안 연구에 대한 개요 .....	180

## <표 차례>

Table 2-1 위험성 평가 기법 일반적 분류 .....	13
Table 2-2 국가별 위험물질 공정산업에 대한 위험성 평가 방법론 .....	22
Table 2-3. FTA의 사상기호 및 논리기호 .....	30
Table 2-4 부울 대수 법칙 .....	31
Table 2-5 빈도와 확률 계산식 .....	32
Table 2-6 정량적 위험 표현 형식 .....	45
Table 2-7 국가별 개인적 위험도 기준 사례 .....	49
Table 2-8 기업별 개인적 위험도 기준 사례 .....	50
Table 3-1 2002 ~ 2008 중대재해(재해 유형별) 사고 건수 .....	57
Table 3-2 한국 천연가스 산업 작업 위험도 분석 매트릭스 .....	59
Table 3-3 한국 천연가스 산업 작업장에서의 직무별/위험유형별 위험도 비율 ..	60
Table 3-4 공정산업에 대한 위험성 평가 연구(논문) 접근 방법론 분석 결과 .....	64
Table 3-5 전 세계 QRA 관련 프로그램/시스템 목록 .....	72
Table 3-6 정량적 위험성 평가 수준별 예상 인력 수요(출처 : CCPS) .....	76
Table 4-1 고장확률, 불가용도 계산을 위한 입력 변수 배분 .....	89
Table 6-1 (사례분석 1) 고려된 누출 사고 시나리오 및 결과 분석 유형 .....	139
Table 6-2 정압설비 ARHSP 작성을 위한 질의문 예시 .....	143
Table 6-3 개발 시스템을 이용한 153 개 가스시설 QRA 소요 시간 .....	150
Table 6-4 CCPS 가이드라인에 근거한 153 개 가스시설 QRA 예측 소요 시간	151
Table 6-5 (사례분석 2) 고려된 누출 사고 시나리오 및 결과 분석 유형 .....	155
Table 6-6 하역설비 ARHSP 내부 질의 및 수식, 경위, 누출 시나리오 .....	158



# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경

에너지 및 화학 공정산업은 인류에게 편리성과 근로자 및 인접 주민, 환경 등에 커다란 피해를 줄 수 있는 사고 위험성을 동시에 부가하는 양면성을 가진 뚜렷한 주체이다[1]. 전 세계 산업사고로서 최악으로 기록된 1984년 발생한 보팔(bhopal) 사고[2], off shore 산업에서 가장 최악으로 평가되고 있는 165명의 사망자를 낸 1988년 파이프알파(piper alpha) 사고[3], 1976년의 세베소(seveso) 사고[4] 등은 그러한 특징을 잘 말해주고 있다. 이러한 역사적 교훈으로 인해 전 세계 국가들은 공정산업에 대한 위험관리를 위해 엄격한 규제(코드)들을 생성, 적용하고 있으며 그 대표적인 것이 바로 유럽공동체의 Seveso Directive와 미국 EPA의 (40 CFR Part 68: risk management plan), OSHA의 (29 CFR 1910: process safety management)이다. 뿐만 아니라 지속적으로 서로 타 국가들의 검증된 안전 표준들을 코드와 연계시켜 관리를 해 나가고 있다. 여기서 주목할 사항은 위험관리의 세부적 방법에 있어서 국가별, 기업별로 조금씩 다르지만 하나의 핵심적 철학을 견지하고 있는데 그것은 지속적, 순환적 위험성 평가를 통해 잠재되어 있는 위험요소를 끊임없이 확인하고 통제토록 한다는 것이다.

위험성 평가란 공정에 잠재해 있는 위험요소를 확인하고 그것이 사고로 이어질 가능성과 심각성을 평가하여 최종적으로는 위험도로 표현하고 수립한 위험도 기준과 비교하여 안전성 향상 방안을 도출하는 방법론을 말하며 이것은 크게 2가지로 분류한다. 첫째는 위험요소 확인을 주요 목적으로 하는 정성적 평가이며 둘째는 위험을 확률화하여 표현하는 정량적

위험성 평가(QRA : Quantitative Risk Assessment)이다. 공정산업에 대한 QRA는 정성적 평가에 비해 비교적 늦게 1980년 이후 발전되기 시작하였고 그 뿌리는 원자력과 항공 산업의 안전성 평가 기술에 두고 있다. 실질적인 적용의 발현은 유럽에서 먼저 시작되었고[5] 기본적인 활용 분야는 공장의 부지선정, 안전시스템 설계, 비상대응 절차 수립[6]이며 2000년대 부터는 설비의 최적화된 운영 및 보수 정책 수립에까지 적용되고 있다[7].

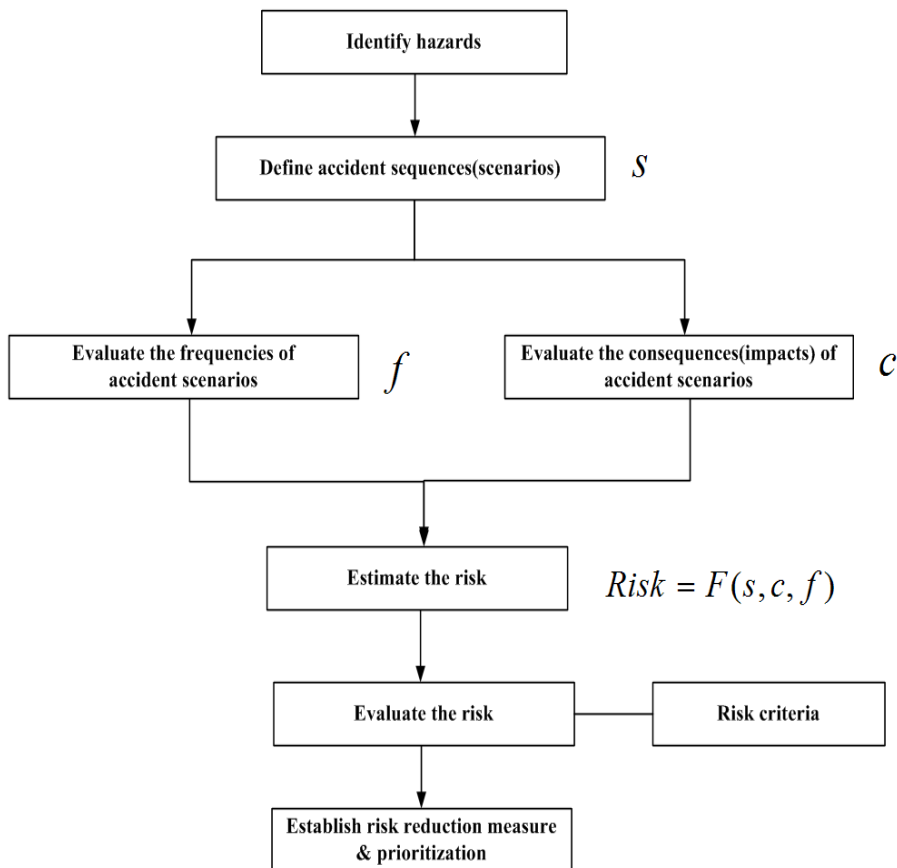


Figure 1-1. 전반적인 위험성 평가 절차

이렇듯 공정산업에 대한 QRA가 도입된 이유는 20세기 후반 새로운 공정기술에 대한 부족한 안전 경험으로 인하여 그에 대한 위험을 예측할 필요성[8]이 있었기 때문이었다. 즉 기존의 정성적 위험 평가는 위험도를 명확히 할 수 없어 의사 결정 지원 도구로 활용하기에는 한계가 있었고 효율적 위험관리 측면에서도 계량화되어야 할 필요성이 있었기 때문이다[9]. 특히 최근에는 안전성에 초점이 맞추어진 생성 초기와는 달리 공정산업의 양적 증가, 인구 증가, 부족한 부지 등으로 인해 여러 위험 상관관계가 보다 복잡해지고 생산성(효율성)도 고려해야 하는 단계에 접어들어 따라 그 필요성이 더욱 부각되고 있다.

QRA의 가장 큰 효용성으로 간주되는 점은 비용-효과 측면에서 위험 감소 방안을 수립하는 데 매우 도움이 된다는 것이다[5, 10]. 만일 위험이 정성적으로만 평가된다면 도출된 안전성 향상 방안의 효과들에 대한 불확실성이 존재하며 이로 인해 위험도 감소에 기여하지는 않고 불필요한 과비용만을 유발하는 문제를 발생시킬 수 있는 데 이때 QRA가 해결의 적합한 도구로서 큰 역할을 하게 된다.

QRA의 또 다른 큰 효용성은 사회 공동체에게 상호 이해와 타협을 할 수 있는 안전 지표로서의 역할[11]을 한다는 점이다. 이것은 현실적으로 공정산업에서 위험을 완전히 제거하는 불가능하다는 인식에서 출발하며 그 타협점(trade-off)을 찾는 데 매우 유용하다.

QRA가 계속해서 발전하는 원동력은 초기부터 현재까지 국가 기관이 사업자에게 안전성이 확보되었음을 증명하라는 규제이다. 예를 들어 영국과 네덜란드는 국토이용계획(land use planning)과 EU directive 96/82/EC, 소위 Seveso II 규제를 받는 기업의 허가에 있어 확률론적 위험 평가에 기반을 두어 안전 정책을 결정해오고 있다[9, 12, 13]. 특히 네덜



란드는 의무적으로 확률 표현의 개인적/사회적 위험도를 근간으로 규제를 하는 대표적 국가이다[11].

이런 규제적 동력과 더불어 최근에는 사업자 측면에서 스스로 QRA를 적용코자 하는 자발적 원동력이 생성되고 있는데 그것은 설비 운영 단계에서 최적 관리 방법론으로 활용코자 하는 것이다. 그 대표적인 예로는 Risk Based Inspection(RBI), Risk Based Maintenance(RBM)와 같은 위험 정보 이용(응용) 기술이다[14, 15]. RBI와 RBM 기법은 1990년대 초반에 제안되어 2000년대에까지 계속적으로 발전하고 있는 상황이며[16, 17, 18] 그 중에 API(American Petroleum Institute)의 RBI 580[19], 581[20]은 산업계와 공동으로 개발된 방법으로서 검사 정책 수립에 관한 가장 대표적인 지침서[21]이다. 궁극적으로 이러한 방법론들은 검사와 보수 정책 수립에 있어 확률론적 위험도에 근거하여 안전을 희생시키지 않으면서 설비의 가용도(availability)를 최대화하고 관리 비용의 최소화를 추구한다.

하지만 이렇듯 안전성 향상과 관리 최적화에 있어 QRA의 역할을 기대할 수 있음에도 불구하고 전반적인 공정생애주기(plant life cycle)에서 QRA를 위험관리 프로세스 활용 도구로 삼지는 못하고 있다. 위험관리의 핵심적 철학은 Figure 1-2와 같이 구성된 상호간의 소통과 검토를 기반으로 위험성 평가(위험요소 확인 및 평가, 예방책 수립과 실행)를 실행하고 그 과정 자체에 대한 관리 체계의 개선을 위험관리 원칙(창조성, 통합성, 체계성 등)에 따라 순환적으로 수행함으로써 안전성과 생산성을 증가시키는 것이다[22]. 하지만 이러한 철학을 견지하기 위해 위험관리 프로세스에 QRA를 수용코자 하는 경우 다음과 같은 이론적, 실행적 차원의 여러 문제들이 존재하며 그것은 결국 위험관리의 첫 출발점인 위험성 평가 자체를 실행하기 어렵게 한다.

- 정량적 위험 분석은 상대적으로 정성적 평가보다 불확실성이 낮다. 하지만 이 방법 또한 분석 모델 및 입력 데이터 불확실성으로부터 이어지는 분석 결과의 불확실성이 있다. 특히 신뢰도 데이터와 사고빈도 모델의 불확실성이 큰 데 이것은 전문가의 판단에 치중되어 분석이 이루어지기 때문이다. 이로 인해 타당성 검증이 어려워 쉽게 공감할 수 없게 되고 결국 일치된 의사 결정 도구로서 발전하지 못하고 있다. 또한 위험성 평가 전문가가 다르게 될 경우 동일한 시스템이라도 그 위험 분석 모델에 대한 관점의 차이로 인해 다른 결과가 도출[23]되며 이로 인해 QRA를 일관성 있는 정책으로 삼을 수 없게 한다.
- 여러 가지 복잡하고 어려운 요소 기술들이 요구되어 QRA 전문가 양성에 오랜 시간이 소요[24]되고 분석 시간 자체도 오래 소요되는 문제가 있다[5, 25, 26]. 이러한 제약은 설비 및 관리 정책 변경, 주변 환경 변화로 인해 다양한 시점에서 QRA가 요구 된다고 했을 때 신속한 결과를 얻을 수 없게 한다. 또한 그 약점을 보완하기 위해서 고비용의 여러 전문가들을 두어야 할 필요성이 대두하는 데 국가나 사업자는 이것을 현실적으로 실행하기 어려운 문제로 인식하거나 공감하지 않는다.
- 위험성 평가는 다양한 이해관계자들이 그 과정과 결과를 모두 검토하고 진행시켜야 하는 과정이지만 QRA는 비전문가들에게는 매우 이해하기 어려워 효과적으로 그러한 과정을 밟을 수 없다. 즉 이러한 사항은 상호간의 소통과 검토를 기반으로 진행해야 할 위험관리 프로세스에서 QRA를 지속적 활용 도구로는 인식하지 않게 한다.

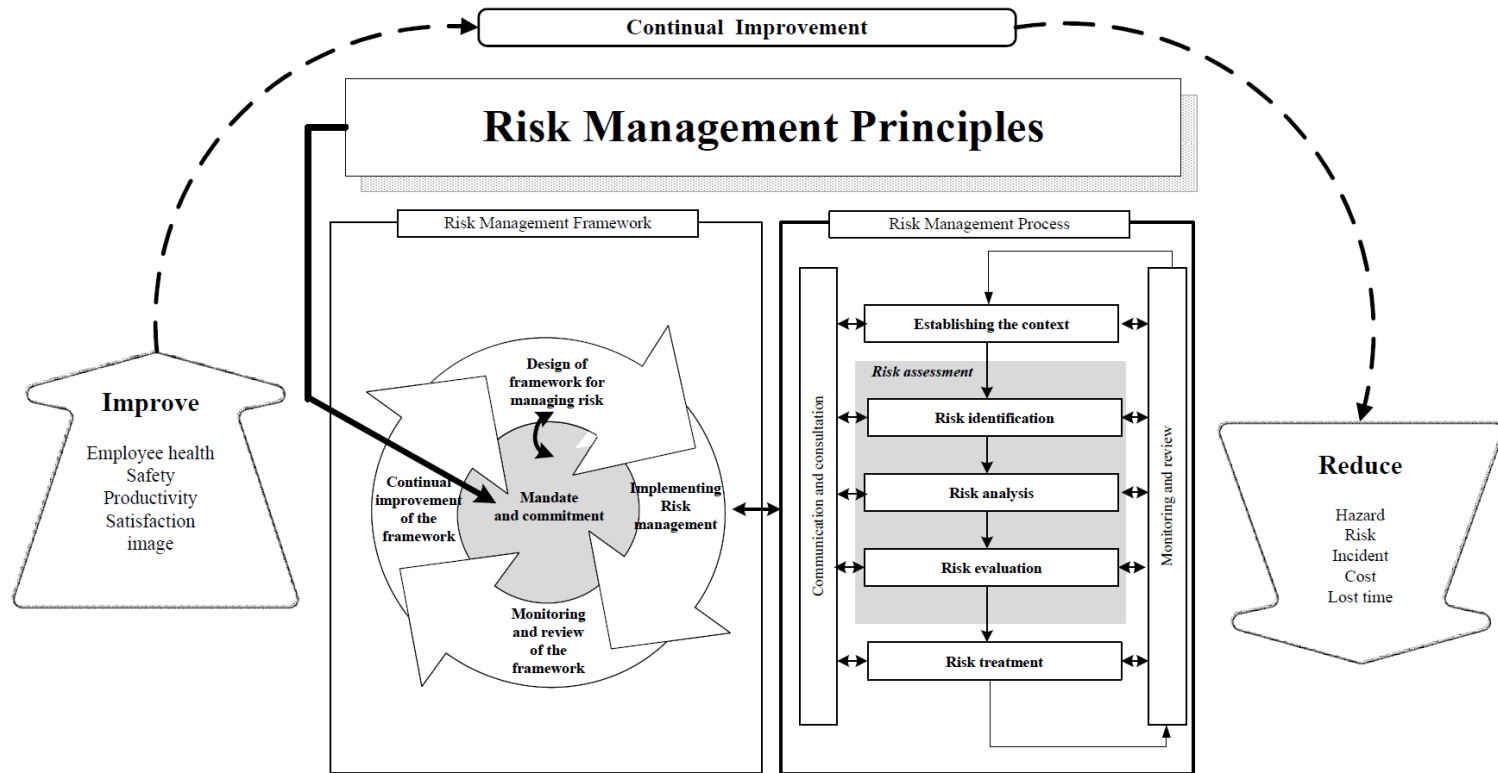


Figure 1-2. 위험관리 체계 (Adapted from ISO 31000)

하지만 위와 같이 실행적, 이론적 차원에서의 여러 문제가 있음에도 불구하고 표준화된 수학적 모델과 신뢰도(고장률) 데이터베이스의 발전, QRA 소프트웨어(프로그램)의 발전으로 인하여 정량적 위험도를 계산하고 표현하는데 많은 진보가 있어 왔다[27]. 그러나 위험 모델을 수립하고 데이터 수집, 분석하는 데 있어서는 여전히 많은 시간이 소요되며 이해관계자들이 분석 과정과 모델을 이해하는 것도 역시 해결되지 못하고 있어 실질적으로 위험관리 체계에 QRA를 수용하지는 못하고 있다.

결국 이러한 상황을 종합적으로 고찰해보면 위험성 평가 자체의 문제뿐만 아니라 인적 자원의 효율적 배분을 위한 모델의 부재, 참고할 만한 효율적 정량적 위험 분석 시스템 모델의 부재가 QRA 활성화에 걸림돌이 된다고 볼 수 있다. 이와 관련하여 최근 주목해야 할 연구 결과가 있는데 그것은 2005년 텍사스 정유 공장 폭발 사고로 인하여 BP 사가 제출한 핵심적인 10개의 공정 안전 향상 권고사항[95] 중에서 4개 항목이 위험지식을 공유하고 지원할 수 있는 시스템 구축을 강조하고 있다는 사실이다. 이것은 기존의 연구[29, 30, 31]에서 관리적 체계의 불완전성이 사고 발생의 중요한 원인을 차지한다는 주장과도 맥락을 같이 한다는 사실임을 감안할 때 매우 중요한 사안임을 알 수 있다.

## 1.2 연구 목적 및 범위

위와 같은 연구배경으로 인하여 본 연구에서는 공정생애주기에서 QRA를 효율적이고 지속적으로 수행할 수 있는 새로운 실행 체계와 시스템 플랫폼을 제시코자 한다. 이것은 QRA에 관한 복합적인 문제들, 즉 분석 자체 문제와 이해관계자들 상호간의 QRA 이해성과 검토성을 해결하는 새로운 패러다임으로서 공정생애주기의 기초 설계 단계부터 운영 단계까지

QRA를 지속적이고 효율적으로 실행할 수 있도록 하는 체계이다. 이를 통해 QRA 적용의 활성화를 이루고 궁극적으로 공정산업의 안전성과 생산성 향상에 기여코자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

아이디어의 출발점은 QRA는 고도의 전문가 영역이긴 하지만 기존 방법론에 대한 이론과 경험에 비춰봤을 때 절차적 측면에서 분업화(협력화)가 가능한 체계로의 전환이 가능하다는 것이다. 이것은 또한 분석자 및 이해관계자들이 위험분석에 관한 모든 과정에 있어 상호간에 쉽게 이해하고 실행해 나갈 수 있는 방법의 구상과 연계된다.

그러한 전환을 위한 첫 걸음으로서 본 연구에서는 새로운 QRA 체계를 제안하며 그것은 Accidental Release Hazard Scenarios Point(ARHSP)라고 명명되는 구심점(분석점)을 기반으로 한 QRA 절차 및 방법이다. 이것은 전문가가 최종적인 사고빈도와 사고결과 계산을 수행하기 위해 비전문가로부터 최대한의 정보를 얻기 위한 질의서와 함수식을 설정해 놓은 분석 정보 구성체이다. 이 분석점의 역할은 이해관계자들이 주요 사고 시나리오를 이해하는 데 도움을 주며 그것이 지리 정보와 연계되고 필요한 데이터가 충족되면 QRA가 주어진 논리 흐름에 따라 쉽게 완료되어 협력적 QRA 실행을 가능케 하고 분석 효율성을 높인다는 것이다.

이를 위해 본 논문에서는 ARHSP 에 대한 상세한 구성과 작성 절차 그리고 그것을 기반으로 한 공정생애단계별 QRA 분석 절차와 정량적 위험관리 프로세스 모델, QRA 시스템 플랫폼 모델을 제시하였다.

또한 이러한 제안한 방법론과 구성에 입각하여 한국 기업의 실제 정량적 위험관리 업무를 위한 웹 기반의 QRA 시스템을 구축하고 적용함으로써 그 방법의 유효성을 실증하였다.

본 논문에서 제시한 QRA 시스템 체계는 국가나 기업에서 효율적 QRA를 위한 시스템을 구축하거나 프로그램 개발시 매우 유용한 참조가 될 것이다. 또한 향후 지속적 위험관리의 도구로써 QRA가 효과적으로 적용되어 안전성 향상과 더불어 생산성 향상에 기여할 것으로 판단한다. 그리고 앞으로 보다 활성화될 위험 정보 기반 기술을 발전시키는데 도움이 될 것으로 판단한다.

본 논문은 기존 QRA 수행 체계를 절차적 측면에서 변경하는 것과 그에 기반한 시스템 구성론적 측면에서의 새로운 체계를 고안하는 것으로서 기존의 다양한 QRA 요소 기술에 대한 상세 설명은 지양하고 전체적인 QRA 관점에서의 변경된 방법론을 서술하고 전개하였다.

### 1.3 논문의 구성

이 절에서는 이 논문에 제시된 내용의 개요를 설명코자 한다.

2장에서는 공정산업에서의 위험성 평가 개요에 대하여 서술하였다. 먼저 2.1절에서는 위험성의 개념과 더불어 정성적 위험성 평가 개론에 대하여 설명하였다. 2.2절에서는 정량적 위험성 평가에 대해서 서술하였는데 각각의 요소 기법별로 설명하지 않고 QRA 일반론적 절차별로 그 개념에 대하여 설명코자 하였다.

3장에서는 최근까지 전 세계적으로 이루어지고 있는 공정산업에 대한 정량적 위험성 평가 적용 및 연구 현황에 대하여 고찰하였다. 3.1절에서는 한국 공정산업 사고 기록과 실제 산업계 현장 근로자들이 위험물질 관련 위험요소에 대하여 위험도 평가한 결과를 분석하여 그 중요성을 살펴보았다. 3.2절에서는 실제 한국의 글로벌 EPC(Engineering, Procurement,

Construction) 사업자의 최근 프로젝트 정보와 최근 10년간 세계 6대 안전학술지에서 게재된 공정산업에 대한 위험성 평가 연구 논문을 분석하여 QRA 연구 동향을 살펴보았다. 그리고 기존의 효율적 QRA 방법론에 대하여 검토하여 보았다. 3.3절에서는 기존 위험 정량화 방법론이 위험관리 도구로 적용하는 데 있어 문제점과 어려움에 대하여 고찰하였다.

4장은 본 논문의 핵심적 내용을 담고 있으며 기본 아이디어, ARHSP 제안 기반 이론, ARHSP의 수식 구성과 그에 기반한 정량 위험 분석 과정을 설명하였다. 또한 ARHSP를 이용한 정량적 위험 관리 프로세스와 공정생애주기에서 QRA를 발전시켜나가는 체계에 관한 개념을 제안하고 서술하였다.

5장에서는 ARHSP를 시스템적 측면에서 실현하기 위한 플랫폼과 그 세부적인 구조를 제시하였다. 그리고 ARHSP 작성 흐름도와 제안한 QRA 플랫폼에 기반하여 초기 설계단계부터 운전단계에서의 정량 위험 분석 절차를 제시하였다.

6장에서는 한국의 가스 산업에 대하여 제안한 방법을 실증적으로 적용한 연구 사례를 보임으로서 향후 유사한 산업이나 시스템 개발자들이 제안한 방법론을 이해하는 데 도움을 주고자 하였다. 사례는 크게 1과 2로 나누어져 있으며 사례 1에서는 천연가스 공급시설에 대하여 협업적 측면에서 QRA를 효율적으로 적용한 과정과 결과에 대하여 보았다. 그리고 사례 2에서는 보다 유연하게 ARHSP를 운영해나갈 수 할 수 있는 시스템 구축과 LNG 시설에 대한 사례 분석을 통해 검토성과 연속성이라는 측면에서의 제안한 방법론이 유효함을 논하였다.

마지막으로 7장에서는 본 논문의 내용을 최종적으로 정리하고 그 결론과 기여에 대하여 서술하였다. 또한 후속 연구로서 현재 한국 내 QRA 적

용을 보다 활성화할 수 있는 연구를 단계별, 주제별로 세분화하여 추진해 나갈 수 있는 절차를 제안하였다. 이것은 본 논문을 통해 그 유효성이 입증된 ARHSP를 기반으로 하여 국가 수준에서 공정산업에 대한 QRA 규격화를 추구하고 규제 기관과 사업자가 정량적 위험성 평가에 대한 공감과 이해를 궁극적으로 도모함으로써 국가의 안전성과 기업의 생산성 향상에 기여코자 하는 연구이다.



## 2. 공정 산업에 대한 위험성 평가

이 장에서는 석유화학 및 에너지 공정 산업에서의 정성적 위험성 평가와 정량적 위험성 평가에 관한 개론에 대하여 논하였다.

위험성에 대한 이해는 위험요소(hazard)의 이해로부터 시작하며 이것의 원론적 개념은 재산, 생명, 환경 등 가치를 부여하는 대상에게 위협을 줄 수 있는 잠재적 상황이나 상태 등을 말한다. 이러한 위험요소는 원치 않는 결과(사고)로 이어질 수 있는 데 분석적인 측면에 그 결과가 규정되고 발생할 가능성과 심각성이 곱(조합)이 되어 표현되면 위험(도)이 된다. 위험요소는 불안전(정) 시작, 과정, 결과를 포함한 일련의 모든 개별, 연속적 속성을 가진 것을 말하고 그 위험도를 표현하는 방식에 따라 크게 정성적 위험성 평가, 정량적 위험성 평가로 구분한다. 일반적으로 정성적 평가 기법은 위험요소 도출과 위험도를 표현하기까지의 일체의 절차를 모두 가지는 기법으로서 심각성과 가능성에 대해서는 직관과 경험에 비추어 범주화된 척도를 부여하는 것이 통상적인 위험 표현이다. 정량적 평가 기법은 위험을 확률적으로 표현하기 위해 필요한 개개의 요소 기법들을 말하며 이에 대한 총칭은 정량적 위험성 평가이다.

실질적으로 화학공장과 같은 다양한 물질과, 복잡하고 거대한 공정을 가진 설비에 대해서 위험을 모두 정량적(확률적)으로 평가하는 것은 시간과 자원, 데이터의 한계 등으로 인하여 쉽지 않다. 따라서 위험요소 확인과 그 위험도를 직관과 경험에 비추어 수행하는 정성적 평가가 현실적으로 많이 활용되는 데 가장 큰 장점은 논리와 의사 결정과정이 이해하기 쉽고 상대적으로 적은 노력으로 이루어질 수 있기 때문이다[11]. 하지만 정성적 평가 결과로는 공장 외부에 영향을 주는 위험요소가 예측될 경우

안전에 관한 의사 결정을 하기가 매우 어렵고 설비 관리 방안의 최적화를 위한 적용에 있어서도 한계가 있다. 실질적으로 설비 투자 자원의 제약이 있는 산업분야에서 비용-효과 측면을 고려하지 않을 수 없으며 이로 인해 설계, 운영 등 여러 가지 명확한 의사 결정을 위해서는 정량적 평가가 보다 적합하다[11]. 이 두 기법은 독립적이지 않으며 위험을 어떤 식으로든 표현하기 위해서는 위험요소를 확인하는 과정을 공통적으로 반드시 거쳐야하므로 정성적 평가는 정량적 평가의 필수적인 선행 단계가 된다.

Table 2-1 위험성 평가 기법 일반적 분류

정성적 평가 기법	정량적 평가 기법	
	사고빈도	사고결과
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Safety review</li> <li>• Checklist analysis</li> <li>• Preliminary Hazard analysis</li> <li>• What-if analysis</li> <li>• HAZOP analysis</li> <li>• FMEA</li> <li>• Job safety analysis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modeling analysis               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fault/Event tree analysis</li> <li>- Cause-consequence analysis</li> </ul> </li> <li>• Supplementary analysis               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipments/Human reliability analysis</li> <li>- Common cause analysis</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Discharge analysis</li> <li>• Flash and Evaporation analysis</li> <li>• Dispersion analysis</li> <li>• Fire analysis</li> <li>• Explosion analysis</li> <li>• Effect analysis               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Thermal effect</li> <li>- Blast overpressure</li> <li>- Probit analysis</li> </ul> </li> </ul>

## 2.1 정성적 위험성 평가 개론

석유, 화학 및 에너지 공정산업에는 사실상 무한개의 잠재 위험요소가 있으므로 이를 평가하기 위해서는 체계적인 평가 방법과 구조, 절차가 필

요하다. 위험요인을 무작위로 도출하고 평가하는 것은 생각의 다양성을 고려하는 측면에서 좋으나 일관성, 이해성, 평가 효율성 측면에서는 오히려 문제가 된다. 따라서 분석의 목적과 범위, 제한 조건에 따라 일정한 틀을 가지는 평가 기법들이 개발되었는데 위험요소를 확인하는 방법에 따라 크게 2가지로 분류된다. 하나는 기존의 기술적, 이론적 경험 등에 바탕을 두어 미리 준비된 위험요소/인자 목록을 가지고 검토해나가는 기법이며 또 다른 하나는 물질, 공정, 운전 등을 고려하여 미리 정해진 체계(알고리즘)를 기반으로 시나리오 방식으로 위험요소를 확인하고 전개해나가는 예측 기법이다. 전자의 대표적인 예로서는 체크리스트 기법, 상대 순위 방법(relative ranking method) 등이 있으며 후자는 대표적으로 HAZOP(Hazard and Operability Analysis), FMEA(Failure Mode Effects Analysis) 등이 있다.

체크리스트 기법은 미리 정의된 검토 목록/절차를 가지고 위험성을 평가하는 방법으로서 제한된 시간내에 대략적(개략적) 위험 평가가 가능한 장점이 있다[32, 33]. 하지만 경험이 없는 공정에 대해서는 평가를 할 수 없고 목록의 불안전성 때문에 최소 안전 기준 설정에만 활용할 수 있다.

상대 순위 방법은 공정내에 존재하는 물질, 운전(고온, 고압 등), 장치 등의 특성들을 반영한 인덱스(index)를 근거로 하여 미리 정의된 알고리즘에 따라 상대적 위험성을 다시 최종 인덱스로 표현하는 방법론으로서 가장 널리 알려진 것은 Dow Fire and Explosion Index and the Mond Index[4] 이다. 이 방법은 위험을 증가시키는 공정 물질이나 조건에 대해서는 페널티(penalty)를, 완화시키는 특성에 대해서는 크레딧(credit)을 부여하며 이 값을 최종 종합한 후 공정의 상대 위험 순위를 지표화 하는 것이다. 이 방법은 설계 전 부지, 공정 선정시 여러 대안(alternative) 들을

비교 검토하는 경우 유용하게 활용할 수 있지만 위험에 관한 구체적 정보를 제공하는 것은 아니다.

예측 성격으로 구분된 정성적 평가 기법들은 문제의 발생 계기(trigger)를 규정하는 방식, 즉 원인부터 결과까지 사고 시나리오를 전개 방법에 따라 구분된다. 일반적인 적용/연구 절차는 Figure 2-1과 같이 문제의 정의, 팀의 구성 및 정보 수집, 트리거로 인한 발생 가능한 사고결과 및 기존보완책 검토, 안전성 향상 방안 도출, 실행 계획 수립 및 적용으로 구성되어 있다. 여기서 가장 중요한 개념 및 원칙은 여러 전문가가 한 곳에 모여 Figure 2-2와 같은 각 기법별 주어진 설계 및 공정 자료와 분석기록지를 기반으로 창조적 발상과 체계적 상호 작용(예, 난상토론(Brain Storming))을 통해 많은 문제점과 안전성 향상 방안을 도출하는 것이다.

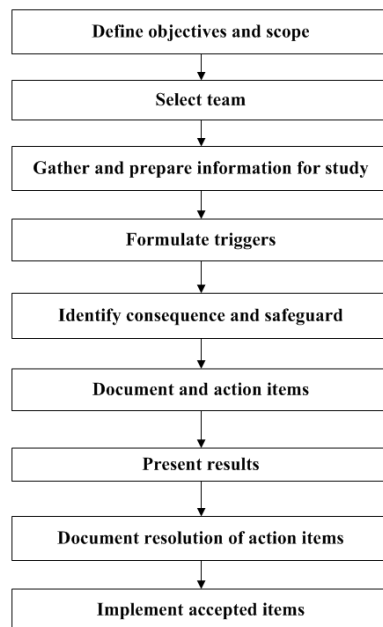


Figure 2-1 시나리오 기반 정성적 위험성 평가 연구(적용)의 일반적 절차

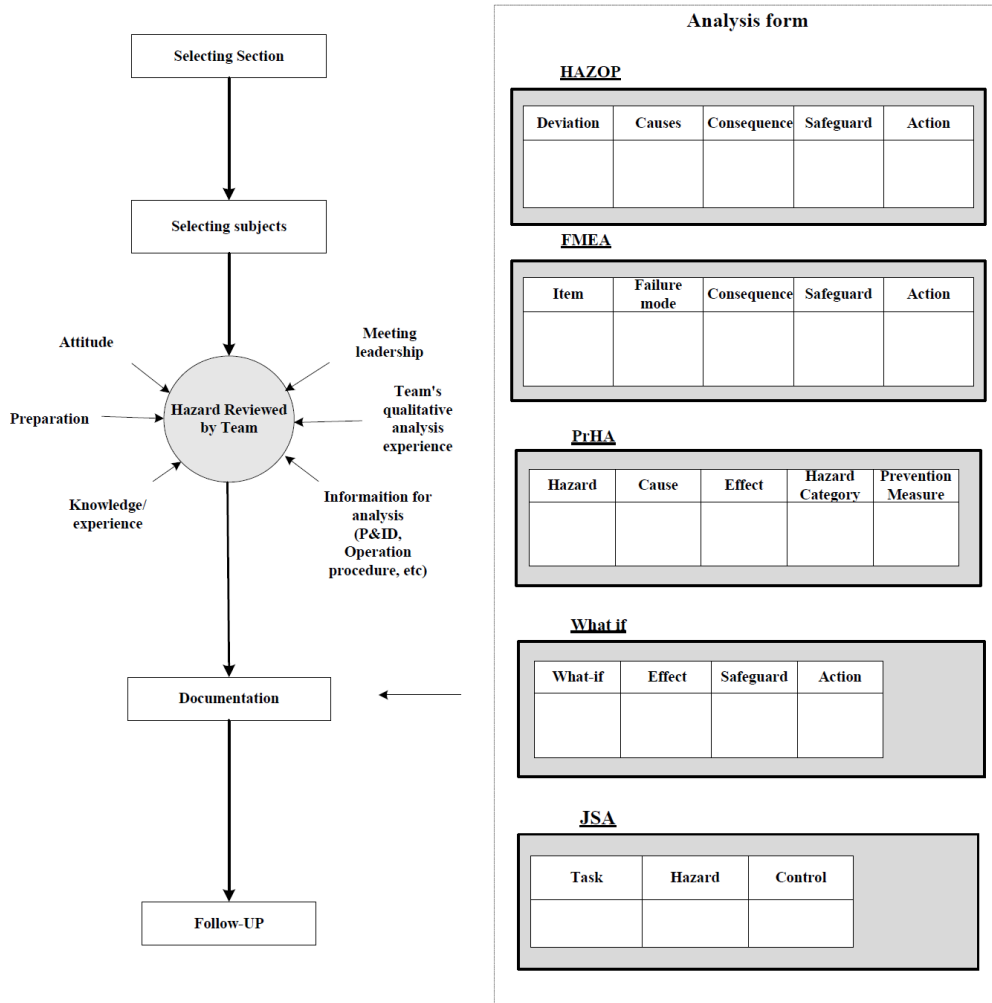


Figure 2-2 정성적 위험성 평가 기법 개요 및 분석기록지 체계

이러한 유형의 그 대표적 기법은 HAZOP이며 이것은 문제의 출발점을 공정변수(process parameter)와 가이드워드(guideword)의 조합으로 표현한 이탈(deviation)로 정의하고 후속 사고가 발생할 과정을 서술하고 전개해나간다. HAZOP은 정성적 기법들 중에서 가장 체계적인 기법으로서 1960년대 영국 기업인 I.C.I(Imperial Chemical Industries)에서 개발되었고 1990년대부터는 전 세계적으로 건설 및 설계, 운전 단계까지 가장 널리 활용되는 공정위험분석(process hazard analysis) 기법이다[28, 34, 35, 36, 37]. HAZOP은 노드(node)라고 하는 분석점, 즉 공정이나 조업에서 설계의도로부터 벗어날 수 있다고 예측되는 지점을 중심으로 분석해나가는 기법이다. 노드가 선정되면 선택한 이탈을 기준으로 원인, 결과, 기존안전책(safeguard), 위험도 순위로 분석하며 평가된 위험도가 수립된 기준보다 높은 경우 추가적 안전 방안을 수립한다. 여기서 가이드워드와 이탈은 분석의 필요성에 따라 새롭게 생성될 수 있다. 이 기법은 많은 노드, 이탈별로 분석을 해나가기 때문에 평가 시간이 많이 소요되고 평가팀 전문성과 경험에 크게 의존하기 때문에 주관적 평가가 될 수 있는 단점이 있다. 이와 관련한 대안적 방법으로는 사전에 저장된 전문가 지식 기반(expert knowledge-base)에 의해 수행하는 optHAZOP 방법[38]이 있으며 이것은 분석 시간을 축소하고 신뢰할 만한 결과를 얻는 데 유용하다. 최근에는 자동화를 통해 분석을 수행하려는 시도가 이루어지는 방법이기도 하다.

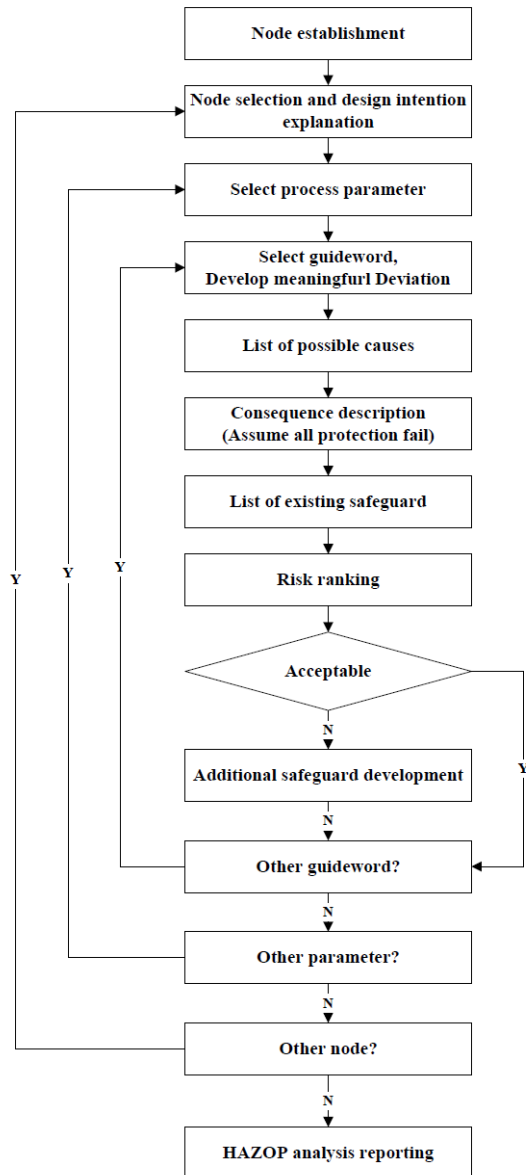


Figure 2-3 HAZOP 세부 분석 절차

FMEA는 아이템(설비)을 중심으로 그 고장모드별로 공정에 미치는 영향을 조사하고 이에 대비한 적절한 안전설비와 절차들이 준비되어 있는가를 검토하는 기법이다[4]. 본질적으로 문제의 시작점을 설비의 고장에 두는 것만 다르고 그 이후의 시나리오 전개, 즉 결과, 위험도 산정, 보완사항 서술 등은 HAZOP 과 동일하다. 인적오류도 하나의 고장 주체로 볼 수 있고 그에 따라 각 인적오류(실수) 모드별로 사고 시나리오 분석이 가능하다[39]. FMEA는 상대적으로 HAZOP 보다 쉽게 이해된다는 장점이 있으나 HAZOP과 마찬가지로 다양한 장치들의 조합에 의한 사고 원인과 현상을 고찰하는 데 있어서는 유효하지 못한 단점이 있다.

What-if 기법은 전문가들이 모여 설비에 대한 지식과 경험을 기반으로서 일체의 질문들을 만들고 각 질문들에 대한 답변을 유도하고 서술함으로서 그 관심 위험을 평가하고 개선책을 제시하는 기법이다. 특정한 형식이 없기 때문에 개념 및 상세 설계, 건설 및 운전과 보수 등 다양한 공정 생애주기에서 위험요소를 확인할 수 있는 가장 폭이 넓은 분석 기법이다. 하지만 결국 평가의 수준이 그 질의를 작성하고 답변하는 팀의 전문성에 크게 의존하고 특정 위험요소는 놓치기 쉽다는 점, 형식이 없어 분석의 완전성을 감사(확인)하기 어려운 여러 단점들이 있다.



## 2.2 정량적 위험성 평가 절차 및 방법론 고찰

20세기 후반에 석유화학 공정산업에 관한 새로운 설계 기술이 급속하게 발전한 반면 그 안전에 대한 경험은 상대적으로 많이 부족해 안전성과 신뢰성 분야의 합리적 의사 결정을 위해 QRA가 급속하게 발전하게 되었다 [8]. 특히 유럽에서 QRA 기술에 대한 관심과 적용으로 인해 많은 발전이 이루어졌으며 현재까지도 방법론들이 개발되고 개선되고 있다.

QRA 방법론은 매우 다양한 이론, 즉 철학적, 공학적 이론들을 포함하고 있으며 그 분석 영역은 크게 사고빈도와 사고결과 분석으로 나누어진다. 일반적으로 물질 누출로 시작하는 사고결과분석은 확률론적 해석에 해당하지만 사고빈도 분석은 원자력 분야의 NUREG 1983, 1985, 0492[40]에서 보는 바와 같이 확률론적 해석이기 때문에 총체적으로 QRA는 후자에 해당된다. 공정산업의 안전규제와 관련하여 국가별로는 Table 2-2에서 보는 바와 같이 사고빈도와 결과분석 모두를 요구하는 경우도 있지만 결과분석만이 요구되는 경우도 있다. 하지만 여러 문헌 및 산업 동향을 살펴볼 때 QRA(확률론적 위험 기반) 체계로 전환되고 있는 것은 명확하다.

전 세계에서 네덜란드는 가장 체계화되고 표준화된 QRA 절차와 위험도 기준[41, 42, 43]을 가지고 있고 실질적으로도 그 평가 결과에 따라 공장 건설 및 운영에 대한 법적 허가가 이루어지는 국가이다[12]. 영국은 QRA를 자국의 모든 안전 기준으로 활용하지는 않지만 HSE(Health and Safety Executive)는 위험의 표현 방법으로 수용하고 허가에 관한 의사 결정에 있어서 실질적으로 QRA를 활용하고 있는 국가이다[9]. 프랑스는 확률론적 위험 평가를 최선이라고 인정하면서도 허가 문제에 있어서는 결과분석만을 활용하였으나[43] 2001년 Toulouse 사고 이후부터는 semi

quantitative 기법을 개발하여 전문가가 평가한 사고빈도를 적용하여 위험도를 표현하고 공장 운영 허가 및 토지 이용 계획에 활용하고 있다[13]. 독일은 확률적 빈도분석은 꺼리고 결과분석에 기반하여 의사결정을 하고 있고 있지만 최근에 변화가 있다[44]. 벨기에는 각 지방별로 서로 다른 방법론을 적용하는 국가인데 Walloon 과 Flanders 지역은 위험도 기반 평가로서 특이한 점은 위험 규정에 있어 최종 손실 유형이 사망이 아닌 회복 불능 상해에 관점을 둔다는 점이다[13]. 미국도 주별로 다른 접근을 하고 있으며 현재까지 대부분 정성적 위험 평가와 결과분석을 요구한다. 하지만 캘리포니아 주는 제한적인 확률론적 평가를 요구한다[45]. 한국은 1996년에 시작한 PSM 제도로 인해 한국산업안전공단(KISCO)에 의해 기업의 PSM 요소(12개)들이 평가되고 있고 그 중에 위험성 평가는 정성적 평가와 사고결과분석에 초점이 맞추어져 있다[46].

QRA는 Figure 2-4에서 보는 바와 같이 방법론 및 영역에 따라 필요한 데이터와 활용 결과물이 규정된다. 사고빈도 분석(확률적 분석)만을 하는 경우는 필요 정보로서 설비의 구성(P&ID) 및 기기의 기능 리스트, 신뢰도 데이터, 정비 정책 등이 있어야 하며 분석 결과는 사고의 빈도, 신뢰성, 중요 고장 모드 도출 등 확률적 측면에서의 서열화된 정보로 한정된다. 이와 관련한 산업계의 주요 적용 분야는 RAM(Reliability Availability Maintainability), SIL(Safety Integrity Level) 분석이 있다. 사고결과 분석은 공정 물질 및 운전 정보와 주변 인구 및 환경에 대한 데이터를 기반으로 관심 피해 영향 범위를 구하는 것이 주목적이며 부지 선정, 설비간 이격거리(배치), 비상절차서 수립 등에 활용한다. 따라서 사고빈도 및 결과분석을 총합한 QRA를 위해서는 위에서 언급한 모든 정보가 있어야 하며 그 결과물은 규정한 피해가 발생할 확률로 표현됨으로서 적정한 의사결정이 가능하게 되는 것이다.

Table 2-2 국가별 위험물질 공정산업에 대한 위험성 평가 방법론

국가	위험성 평가 방법론	규제 기관
스웨덴	Risk based approach or Consequence based approach	County Administrative Boards, Municipalities, Working Environmental
영국	No specification on method Risk based approach in reality	Health and Safety Executive (HSE) and Environmental Agency (EA)
벨기에	Risk or consequence based approach (Flanders and Wallonia region, risk base method)	Administration of Labour Safety
네덜 란드	Risk based approach	Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM)
프랑스	Risk based approach (Semi Quantitative)	
스위스	1 stage ; Hazard assessment 2 stage ; Risk based approach	Swiss Agency of Environment, Forest and Landscape (SAEFL)
폴란드	No specification on method	
캐나다	Consequence based approach	Council for Reducing Major Industrial Accidents (CRAIM )
미국	Consequence based approach	Occupational Safety and Health Administration (OSHA) and the Environmental Protection Agency (EPA)
한국	Consequence based approach	Korean Industrial Safety Corporation (KISCO)

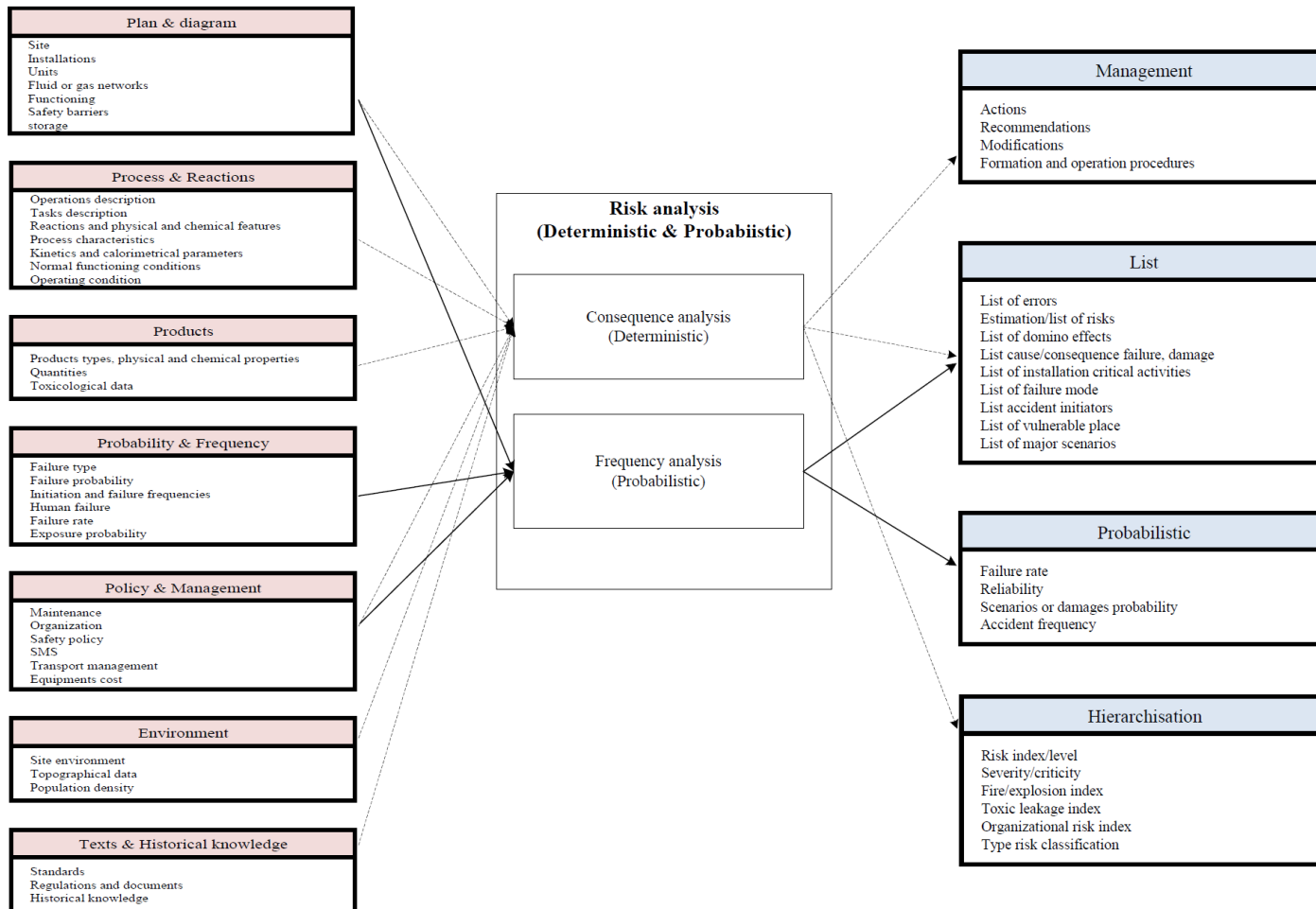


Figure 2-4 정량적 위험성 평가 기법 분류별 필요 정보 및 결과

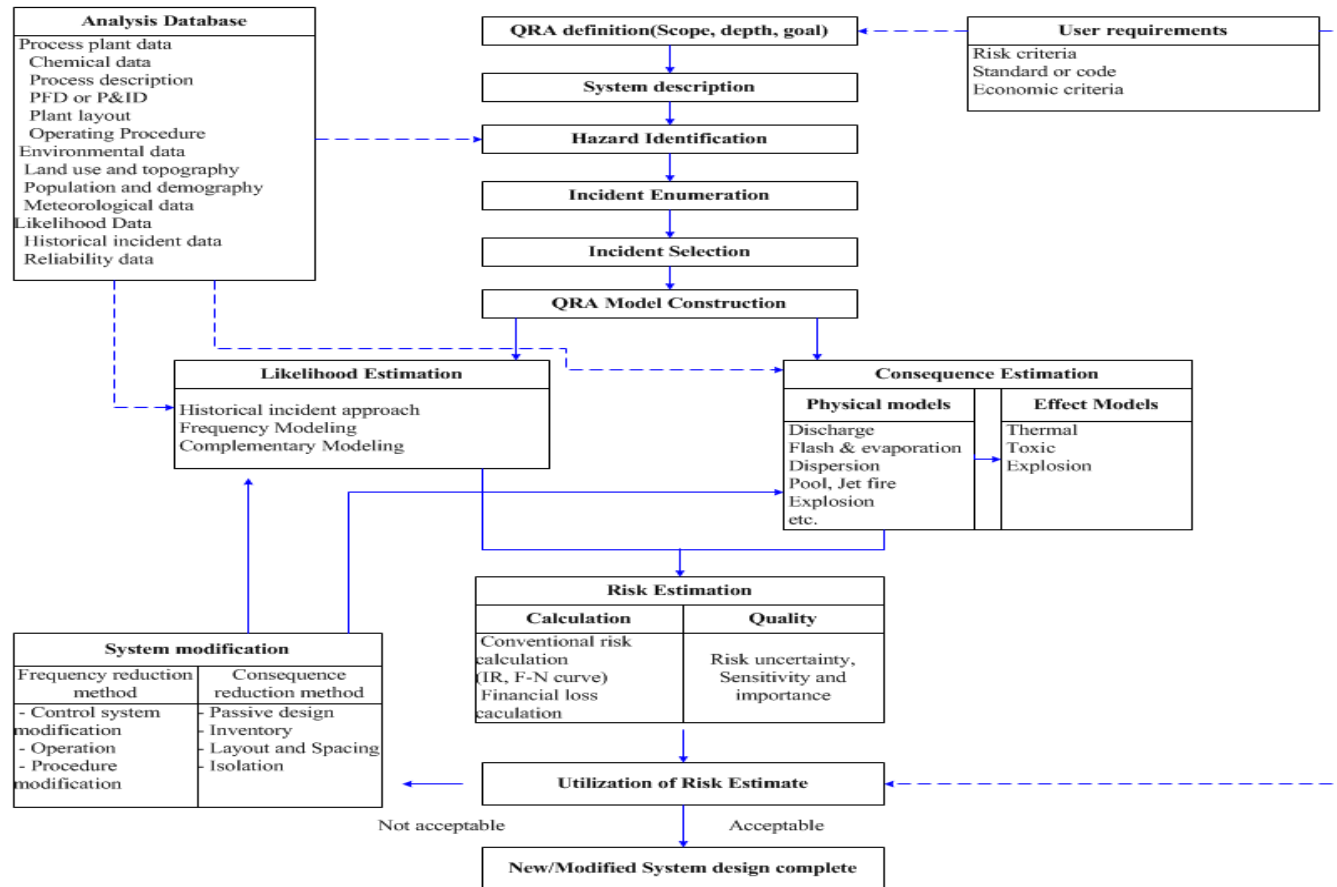


Figure 2-5 정량적 위험 분석의 일반적 절차

## 2.2.1 QRA 목적 수립 및 위험요소 확인

Figure 2-5에서 보는 바와 같이 QRA 첫 번째 단계는 분석의 목적과 범위를 명확히 하는 것이다. 건설 단계에서는 관련 코드나 표준에 근거하여 수립되지만 운영 단계에서는 기업내 표준 또는 위험 기반 의사 결정 정책에 의하여 수립된다.

목표와 범위가 설정된 후 이 단계에서 수행해야 할 것은 위험요소에 대한 확인이다. 위험요소에 대한 확인은 첫째, 물질 자체가 가지는 본질적 위험요소에 대한 확인과 주변에 원치 않는 결과(인명, 재산 손실 등), 즉 사고를 발생시킬 수 있는 다양한 경위 측면에서의 위험요소 확인이 필요하다. 사고 경위와 관련한 위험요소 확인 단계에서는 잠재적으로 내부와 외부의 요인에 의하여 규정한 손실을 유발할 수 있는 원인들을 체계적으로 확인하는 것으로서 2.1절에서 설명한 정성적 평가 기법인 HAZOP, FMEA, Checklist 등이 이용될 수 있다. QRA 에서 주로 다루는 위험요소는 공정에서의 물질의 누출로 인한 화재, 폭발과 같은 화학적 현상이나 에너지 방출과 같은 위험요소이다.

## 2.2.2 누출 사고 생성 및 선택

공정산업에 대한 위험요소는 궁극적으로 물질의 누출로 시작하며 그 가능한 누출 시나리오는 사실상 무한하기 때문에 현실적으로 모든 시나리오를 분석하기는 불가능하다. 따라서 분석을 시행할 누출 사고를 생성하고 선택하는 과정이 반드시 있어야 하는 데 여기서는 중요 사고를 누락하지 않도록 하는 것이 가장 중요하다. 이와 같은 과정에서 2.1절에서 언급한 정성적 위험성 평가 기법을 통해 도움을 받을 수 있다. 하지만 불행하게도 이러한 위험요소 확인 방법들, 정성적 평가 방법들 가운데 QRA 분석

대상으로 삼을 사고 목록을 바로 생성해주는 기법은 없다[5].

사고 목록이 생성되면 분석이 대상이 될 사고를 선정(선택)해야 한다. 분석의 목적에 부합하고 연구의 제약 사항을 만족하는 최소한의 사고를 선택하는 것이 가장 적합한 방법이며 그 절차는 Figure 2-6과 같다. 초기 생성된 목록에서 그 영향이 미미한 사고를 제거하면 수정된 목록이 생성되는 데 여기서 QRA 전문가는 너무 과소평가하여 중요한 사고를 누락하지 않도록 해야 한다. 수정된 목록을 가지고 유사한 사고들로 그룹핑하고 그룹핑된 집합을 하나의 사고로 대체하면 밀집된 사고 목록이 생성된다. QRA 단계에서는 주로 이 사고 목록이 활용된다.

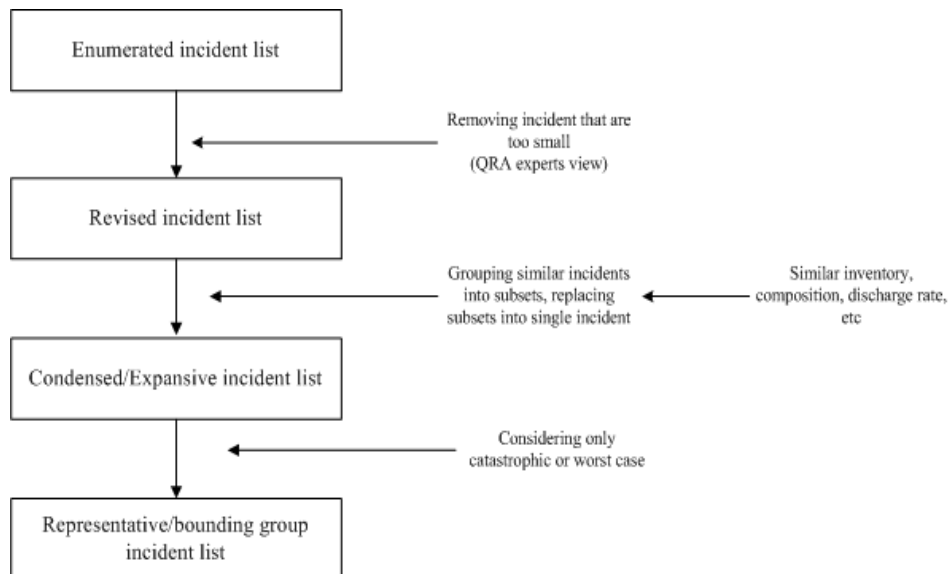


Figure 2-6 QRA 분석 대상 사고 목록 선정 절차

분석이 될 사고 목록이 생성되면 각 사고로 인해 나타날 수 있는 결과(outcome)에 대한 면밀한 검토를 통해 정량화할 가능한 사고 현상을 선정해야한다. 이것은 물질 누출이 발생한 후 확산이나 점화가 일어나는 경우 어떤 결과가 생기는 지를 검토하는 것이다. 일반적으로 가스 상태의 누출로 인한 결과로는 Jet 화재, 증기운 폭발, Flash 화재로 구분되고 독성 가스인 경우에는 확산이다. 액체인 경우는 Pool 화재, Flash 화재, 폭발로 구분될 수 있으며 독성 액체인 경우에는 기체 상태와 동일하게 확산이다.

사고결과가 선정되면 날씨에 따른, 즉 풍속, 온도, 대기안정도, 습도 등의 주변 환경 요소들을 고려하여 사고결과 경우(incident outcome case)가 선정되어야 한다. 일반적으로 이 단계에서 분석의 양이 크게 증가하기 때문에 QRA 전문가의 경험과 지식에 기반하여 그 수를 합리적으로 선택하고 제한한다.

QRA를 수행해야 할 누출 시나리오를 선택하는 것에 대한 대안적으로 방법으로는 HIRA(Hazard Identification and Ranking Analysis)방법론이 있다[47,48]. 이것은 도출된 모든 시나리오에 대하여 물질에 따른 폭발 및 독성 지수와 설비 고장에 관한 사고 가능성 지수, 그리고 사고 방지와 관련된 credibility 지수를 이용하여 최종적으로 QRA를 수행해야할 credible accident scenarios를 선별하는 기법이다. 이에 관해서는 많은 적용 연구들 [6, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55]이 있으며 이는 궁극적으로 QRA 분석 대상 시나리오 선정에 있어 효율적인 선별을 통해 분석의 시간과 자원을 절약코자 하는 것이다. 이 외 의미 있는 hazard path를 찾기 위해 장치, 물질, 구조 지식 베이스와 Deviation, Malfunction, Accident analysis 알고리즘을 이용한 방법론도 제시된 바가 있다[92].



### 2.2.3 사고빈도 분석

사고빈도 분석은 규정된 손실이 발생할 빈도를 일반적으로 단위를 년으로 계산하는 것으로서 크게 2가지 방법에 의해 얻어진다. 첫째 사고 기록(historical data)을 활용한 방법과 둘째는 모델을 이용하는 방법, 즉 고장수목분석(FTA : Fault Tree Analysis), 사건수목분석(ETA : Event Tree Analysis)을 이용하는 방법이다.

사고 기록을 활용하는 방법은 분석자에게 복잡한 상상을 유발하지 않고 비교적 쉬운 분석을 가능케 함으로 다양한 QRA 수준과 깊이에서 활용 가능하다. 이 방법의 그 시작은 분석의 목적에 적합한 통계 데이터를 수집하고 기본적인 검토 단계부터 시작한다. 기본 검토 후에는 적합성에 대한 검토를 수행한다. 적합성 검토는 수집 데이터의 과거적 정도, 다른 환경 등 분석 시점에서의 측면에서 봤을 때 그 기술의 다름을 검토하고 판단하는 것이다. 적합한 경우는 단순 산술식에 의해 계산이 이루어지고 적용된다. 이 방법은 적용이 쉽지만 실제 산업 현장의 여건상 그 조건에 해당하는 자료가 희박한 경우가 많아 얻을 수 없는 경우가 많고 새로운 기술인 경우 더욱 그러하다.

모델을 이용한 사고빈도 분석은 주로 fault tree와 event tree를 활용하여 분석하는 방법론으로서 Figure 2-7와 같이 빈도 모델을 수립하여 중요 사고 경위와 기본 사건에 대한 고찰, 정량화, 중요도 분석을 수행한다. 그리고 이 결과와 사고결과 분석을 통해 얻은 결과와 통합하여 확률적 위험도를 산출하고 그 개선안을 얻기 위한 중요한 통찰을 하게 된다.

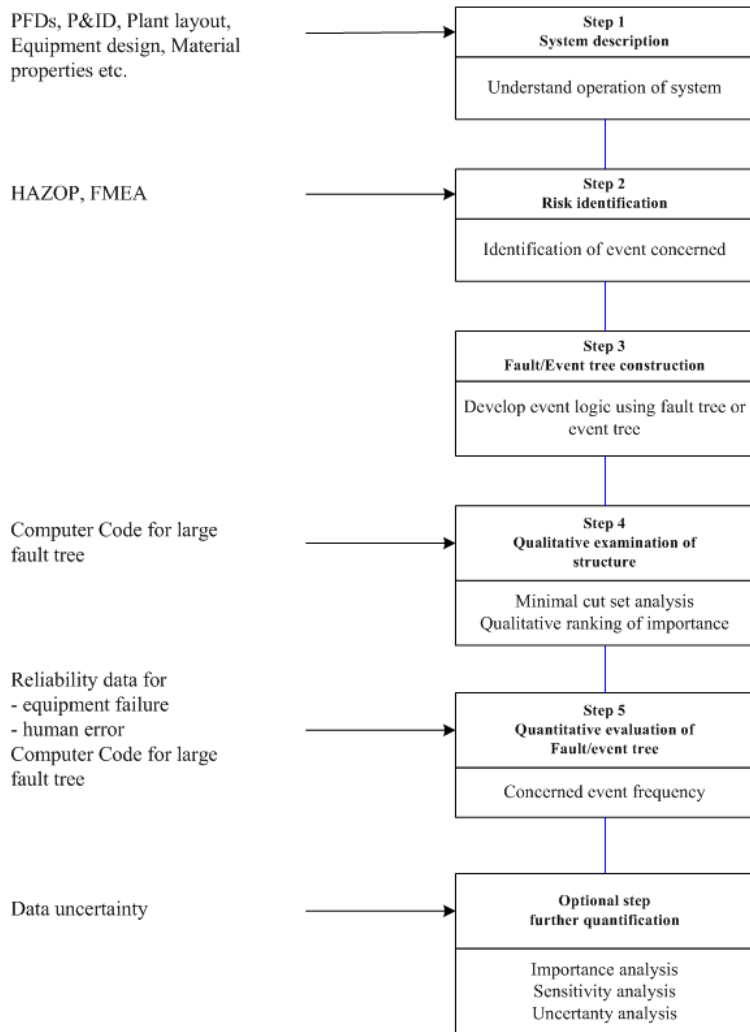




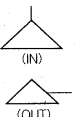


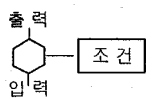


Figure 2-7 모델을 이용한 사고빈도 분석의 절차

fault tree 분석은 1961년 벨연구소에서 개발되었고 1965년의 Haasl 에 의해 보다 발전되었다. 이 방법론은 선정한 정상사상(top event), 즉 시스템 고장(사고)을 발생시키는 원인들을 Table 2-3과 같은 논리 기호를 사용하여 tree 구조로 나타내고 분석하는 연역적인 방법[56, 57]으로서 현재 원자력 산업의 확률론적 안전성 평가 방법론에 있어서 핵심 기법이다.

Table 2-3. FTA의 사상기호 및 논리기호

기 호	명 칭	의 미
	결합사상	몇 개의 기본으로 되는 사상의 조합에 의해 생기는 사상, 원칙적으로 결합사태를 표현하며 더 전개될 수 있는 사상기호, 논리기호의 입력이나 출력이 된다. 예로서는 “시스템 정지” “용기파괴” “압력저하” 등이 될 수 있다.
	기본사상	fault tree를 전개할 때 최종으로 도착한 사상을 기본사상이라 한다.
	비전개 사상 또는 생략사상	정보부족이나 기술적 내용의 불명확으로 실제로는 전개가능한 사상이지만 현실적으로 그 이상을 전개할 수 없는 사상 또는 전개하여도 의미가 없기 때문에 그 이상 전개하지 않고 전개를 멈출 사상, 논리기호의 입력이 된다.
	통상사상	fault tree 기법에서는 결합상태를 다루는 것이 보통이지만, 정상적인 상태가 결합상태의 요인이 된다고 생각되는 사상을 표시한다. 따라서 이 경우는 정상상태이므로 더 이상의 해석이 필요없고, 논리 gate로만 입력된다
	이행기호	조합된 사상기호와 함께 사용되고, 그림처럼 OUT 표시된 가로선이 붙은 삼각형은 밑에서 전개한 FT의 가지를, IN 표시된 위세 선이 있는 삼각형은 밑으로도 같이 있는 삼각형은 전개되는 것을 의미한다.
	AND 게이트	모든 입력사상이 일어난 때에 출력사상이 일어나는 것을 표시
	OR 게이트	입력사상중 적어도 1가지만 발생하여도 출력사상이 발생됨을 표시
	제약 게이트	표기된 조건이 성립될 때에만 출력사상이 발생됨을 표시.

공정산업에 대한 위험성 평가에서 fault tree 분석의 가치는 각 기본사상이 사고에 기여하는 정도, 민감성, 사고를 발생시키는 각 사고경위들의 전체 기여도, 시스템의 고장확률을 이용하여 취약부분을 찾고 시스템의 안전성(신뢰성)을 개선하는 것이다[58]. 여기서 고려되는 기본사상들은 설비고장, 사고를 방지하는 안전장치 실패, 불안정한 인적 행위 등이 될 수 있으며 정상사상을 일으키는 최소사건발생 조합군(MCS : Minimal cut sets)을 도출하여 사고경위(과정)를 쉽게 이해하고 정상사상에 대한 확률을 얻을 수 있다.

언급한 MCS 는 fault tree 기법을 이용한 정성적 평가 단계에서 가장 중요한 결과물이며 이는 Table 2-4와 같은 부울 대수(boolean algebra) 규칙을 통해 도출이 된다. MCS가 얻어진 경우 각각의 cut set의 발생 확률 또는 빈도는 Table 2-5식을 이용하여 계산한다.

Table 2-4 부울 대수 법칙

규칙	표현
Commutative Rule	$A \cdot B = B \cdot A$ $A + B = B + A$
Associative Rule	$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$ $A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributive Rule	$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$ $A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$
Idempotent Rule	$A \cdot A = A$ $A + A = A$
Rule of Absorption	$A \cdot (A + B) = A$ $A + A \cdot B = A$

Table 2-5 빈도와 확률 계산식

게이트	입력 조합	계산식	단위
OR	PA OR PB	$P(A \text{ OR } B) = 1-(1-P(A))(1-P(B))$ $=P(A)+ P(B)-P(A)P(B)$ $= P(A) + P(B)$	$t^{-1}$
	FA OR FB	$F(A \text{ OR } B) = F(A)+ F(B)$	
	PA OR FB	허용 불가	
AND	PA AND PB	$P(A \text{ AND } B) = P(A)P(B)$	$t^{-1}$
	FA AND FB	Unusual pairing, reform to F(A) AND P(B)	
	FA AND PB	$F(A \text{ AND } B) = F(A)P(B)$	

P : Probability , F : Frequency ( $\text{time}^{-1}$ ), t : time (usually year)

사고빈도가 얻어지면 다음과 같은 cut set 또는 각 기본사상들에 대한 중요도 분석을 수행하고 위험 감소를 위한 조치에 있어 어느 부분에 초점을 두어야 하는 지를 파악할 수 있다.

- F-V (Fussel-Vesely) 중요도

특정 사고 시나리오가 정상사상 발생에 얼마큼의 영향을 주는 가를 이해하는 데 도움이 되는 지표로서 관심의 대상이 되는 cut set i의 빈도  $F_i$ 를 정상사상의 빈도  $F^o$  나눈 값으로 아래와 같이 표현된다.

$$FV_i = \frac{F_i}{F^o}$$

- RRW (Risk Reduction Worth): 위험도 감소 가치

특정한 사건이 발생하지 않았다고 가정할 때 총 사고빈도가 감소된 정도를 표현하는 척도로서 아래와 같이 표현된다. 즉 이것은 개선 대상 선정을 위한 지표이다.

$$RRW_i = \frac{F_o}{F_i^-}$$

여기서  $F_i^-$  는 특정 기본사상  $i$  의 확률이 0인 경우 모든 cut sets 빈도 합이다.

- RAW (Risk Achievement Worth): 위험도 달성 가치

매번 특성 사건이 일어난다고 가정했을 때(즉 확률이 1), 위험이 얼마나 증가하는 가를 표현하는 지표이며 해당기기의 고장이 전체 위험도에 얼마큼의 영향을 미치는 가를 알 수 있다. 이것은 위험도 완화 측면에서 순위를 결정하는 데 도움이 된다.

$$RAW_i = \frac{F_i^+}{F_o}$$

여기서  $F_i^+$  는 특정 기본사상  $i$  의 확률이 1인 되는 경우 모든 cut sets의 빈도 합이다.

사고빈도 분석을 위한 또 다른 모델 방법은 event tree 분석이 있다. 이 기법은 초기사건부터 시작하여 분기 사건마다 다음 결과로의 상황으로 전개하는 것으로서 귀납적 방법이다. event tree 는 사고의 발생 경로를 파악하는 데 매우 유용하며 확률적 데이터가 있으면 정량화 계산이 쉽게 이루어진다. 하지만 실제 상황에서는 event tree가 커질 가능성이 높고 불필요한 분지를 하게 되는 경우 분석의 효율성을 떨어뜨리는 단점이 있다.

위와 같은 fault tree 와 event tree 방법은 각각의 장단점이 존재하고 현재 공정산업에 대한 위험성 평가 빈도 분석 모델링에서 실질적으로 적용되는 방법은 이 두 가지를 결합하는 것이다. 그것은 누출에 대해서는 fault tree를 작성하고 누출 후 사건의 분지에 대해서는 event tree를 적용하는 것이다. 여기서 사고결과 및 경우를 나누는 데 있어 event tree가 관여함에 따라 확률적 측면에서 봤을 때 빈도분석의 영역이 어디인지 모호한데 일반적으로 Figure 2-8과 같이 초기 누출부터 누출량에 관여되는 사건까지는 빈도 분석의 영역으로 고려하며 동일한 누출량으로 부터 점화 및 바람 등과 같은 영향인자로 인하여 분지되는 최종 사고결과 및 경우까지의 확률을 계산하는 영역은 결과 분석의 영역으로 간주한다.

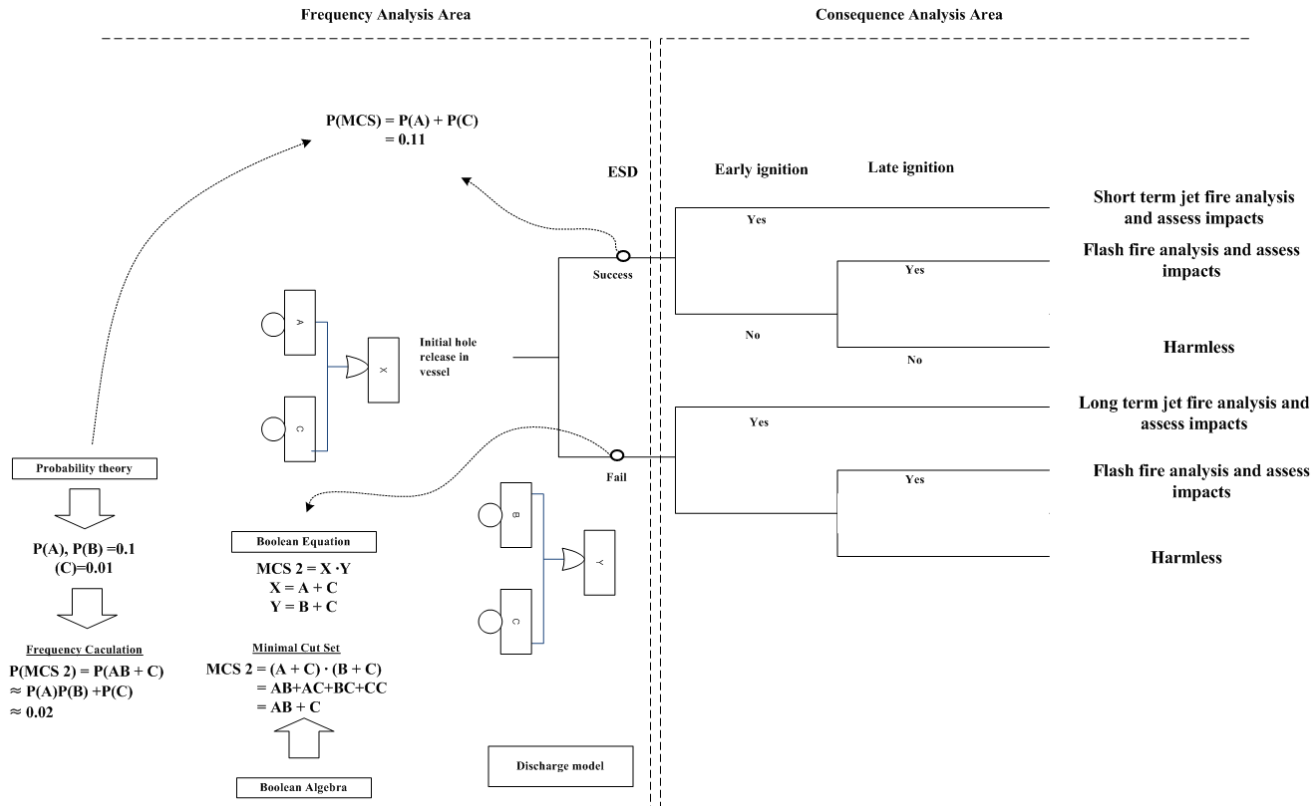


Figure 2-8 사고빈도 분석과 사고결과 분석의 경계 예



공정산업에서 누출을 발생시키는 사고빈도 모델은 대부분 기계나 계기의 연속적 고장으로 인한 경위와 각 기기들의 자체 누출에 관한 것이다 [58]. 여기서 기기 자체 누출은 단일 사건이 정상사상이므로 단순하며 여러 기기들의 고장 조합으로 인한 누출 사고는 크게 3가지 유형의 기본사상으로 정리된다. 그것은 빈도 정보를 가진 초기 사건(initiating event)과 확률 정보를 가진 기기(안전 시스템)의 불가용도, 인적오류이다[59]. 초기 사건은 기본적으로 경험(historical) 데이터로부터 얻거나 모델로 분석할 수 있다. 다만 후자가 필요한 경우는 초기사건과 안전기기의 성공 여부와 관련하여 의존성이 있는 경우다. 기기의 불가용도는 몇 가지 분류로 정리되고 다음과 같다.

- 비감시 주기적 점검 대기 기기 (Non continuously monitored, periodically tested standby components)

#### 1) 점검 주기 내 고장으로 인한 불가용도

$$U = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda T}}{\lambda T} \quad \text{if } \lambda T \ll 1 \quad U \simeq \frac{1}{2} \lambda T$$

여기서  $\lambda$  = 고장률,  $T$  = 점검(테스트) 주기

#### 2) 고장 감지 후 수리로 인한 불가용도

$$U = \frac{\frac{e^{-\lambda(T+T_R)} + \lambda(T+T_R) - 1}{\lambda(T+T_R)}}{1 + (1 - e^{-\lambda T_R})e^{-\lambda T}} + \frac{1 - e^{-\lambda T_R}}{e^{\lambda T} + 1 - e^{-\lambda T_R}}$$

$$\text{if } \lambda_s(T_R + T) \ll 1 \quad U \simeq \lambda T_R$$

여기서  $\lambda$  = 고장률,  $T_R$  = 평균 수리 시간

3) 정규적 예방 보수를 하는 경우 불가용도

$$U = f_m T_m$$

여기서  $f_m$  = 정기적 수리 빈도,  $T_m$  = 수리 소요 시간

- 비감시 비점검 대기 기기 (Non continuously monitored, untested standby components)

$$U = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda T_p}}{\lambda T_p}$$

여기서  $\lambda$  = 고장률,  $T_p$  = 고장 노출 시간

이 경우 실질적으로 생애주기에서 점검이나 감시가 없다면  $U$ 는 1이다. 하지만 실제 상황에서 간접적으로 점검되거나 가동이 요구되기 때문에  $T_p$ 은 추정되는 시간들의 평균이 된다.

- 상시 감시, 비수리 기기 (Continuously monitored, non repairable components)

$$U = 1 - e^{-\lambda T_M} \simeq \lambda T_M$$

여기서  $\lambda$  = 고장률,  $T_M$  = 작동 요구 시간(mission time)

- 상시 감시, 수리 기기 (Continuously monitored, repairable components)

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{\lambda T_R}{1 + \lambda T_R}$$

여기서  $\lambda$  = 고장률,  $\mu$  = 정비율(repair rate),  $T_R$  = 평균 정비 시간

기본사상에 대한 확률분석에서 반드시 고려해야 하는 것은 공동원인고장(CCF: Common Cause Failure)이다. 이것은 동일한 기능을 갖는 동일한 형태의 두 대 이상의 다중기기가 동일한 원인으로 인하여 동시에 실패하는 사건으로 정의된다. 이러한 사건들은 다수의 기기의 수행능력에 영향을 주는 갑작스런 주위환경의 변화, 기기와 인간과의 상호작용, 공통의 설계/제작 오류 등으로 발생된다. 공동원인고장이 특별한 의미를 갖는 것은 동일한 기능을 갖는 동일한 형태의 기기를 다중으로 설치되더라도 시스템의 신뢰도는 증가하나 그 증가정도가 반드시 설치대수에 비례하지는 않는다는 점이다. 이로 인해 사고빈도의 중요도 분석에서 높은 부분을 차지한다. 일반적으로 다루어지는 CCF 인자는 beta factor 모델[60] 을 사용한다. 이 모델은 공동원인이 발생하면 그룹내의 모든 기기가 실패한다는 가정을 사용하고 있다. 이 모델에서 필요한 데이터는 기기의 총 고장확률 데이터( $Q_t$ ) 와 공동원인 고장 분율( $\beta$  인자)이 전부이며 공동원인고장을 고려하기 위해 필요한 매개변수가 하나이므로 단일변수(single parameter) 모델이라고 한다. 여기에서는 다음의 두 가지 고장확률만 정의되고 나머지는 0으로 취급한다.

$$Q_i = (1 - \beta)Q_t$$

$$Q_c = \beta Q_t$$

여기서  $Q_c$ 은 다중기기가 공통원인고장에 의해 실패할 확률이며  $Q_i$ 는 1개가 독립적으로 고장 날 확률을 의미한다.

따라서 이 관계식을 통해  $\beta = \frac{Q_c}{(Q_c + Q_i)}$  을 얻을 수 있으며 궁극적으로  $\beta = \frac{\text{Common cause failures}}{\text{Total failures}}$  가 된다.

인자의 값은 기기의 유형에 따라 크게 변하지 않는다는 이점이 있고 3개 내지 4개의 다중성(redundancy)을 갖는 경우에 비교적 정확하다고 알려져 있다.

기본사상 중에 인적오류가 있는 경우에 그에 대한 확률분석이 필요하게 되며 이와 관련한 대표적인 2개의 기법은 HEART(Human Error Assessment and Reduction Technique), THERP(Technique for Human Error Rate Prediction) 기법이 있다. 이 2개의 기법은 원자력 안전성 평가에 뿌리를 두고 있지만 화학 공정산업에서도 적용되는 기법이다[61].

HEART는 1985년에 개발된 방법으로서 주로 영국에서 사용하는 방법론으로서 직무수행에 영향을 미치는 인자를 선택한 후 각 영향 인자별로 산출 공식에 의해 도출하고 그 각각을 nominal HEP(human Error probability)에 곱하여 최종 인적오류 확률을 산출하는 방법이다[62].

THERP는 1960년대에 개발되었고 최신 개정된 방법은 1983년이다. 이 방법은 직무 단계별로 성공과 실패로 분지해나가면서 실패할 확률은 기본 확률과 수행 특성 인자(performance shaping factor)를 곱하여 산출해나가고 최종 인적오류 확률을 도출해 나간다[63].

## 2.2.4 사고결과 분석

QRA에서의 사고결과 분석은 누출에 대한 정의로부터 시작하게 된다. 즉 독성이나 에너지량을 가지고 있는 독성물질, 가연성 물질과 폭발성 물질의 누출이다. 이와 같은 물질의 누출은 저장탱크(용기)나 배관 구멍, 갈라진 틈 또는 기계적 건전성의 문제가 있는 펌프나 밸브, 플랜지 등에서와 같이 여러 가지 경로를 통해 발생한다.

결과분석을 위해서는 공정으로부터 물질이 어떻게 누출되는지를 기술하기 위해 누출모델을 선정해야 한다. 누출 모델(discharge model)은 누출 속도(질량)와 총 누출량(또는 총 누출시간), 그리고 누출상(고체, 액체, 2상)에 대한 자료를 제공한다.

이어서 확산모델(dispersion model)을 이용하여 바람의 영향으로 인해 물질이 어떻게 이동하고 어떤 농도 수준으로 확산되는지를 설명한다. 만일 가연성 물질의 누출인 경우에는 화재 모델이나 폭발 모델이 열복사나 폭발 과압과 같은 에너지 위험성으로 변환하는 역할을 하게 된다. 이에 대한 논리적 분석 흐름도는 Figure 2-9와 같이 잘 정립되어 있다[5].

영향모델은 특정 사고결과(화재, 폭발, 독성물질 확산)가 인명(상해 또는 사망)과 구조물에 어떤 영향을 주는지를 평가한다. 여기서 개선안으로는 물분무, 포말 시스템, 방호벽, 그리고 피난처나 신속한 대피로와 같이 사고시 그 영향을 경감시키는 방안들이 제시된다.

사고결과 분석은 확정적 해석이지만 사고빈도 분석과 같이 불확실성을 가지고 있다. 이것은 첫째 기하학적 측면에서 누출에 대한 불완전한 이해와 둘째 물질 특성에 대한 불완전한 이해 그리고 공정과 혼합거동에 대한 이해의 부족으로 인해 발생한다.

하지만 사고결과 분석에 관한 불확실성들은 일부 미지의 사항들을 보수적인 값으로 설정함으로서 의사 결정에 활용할 수 있다. 다시 말해 보수적인 사고결과 값을 위험도 평가에 적용하는 것이다. 그렇지만 이러한 접근은 위험 경감을 위한 설계 요소가 과도하게 될 가능성을 낳는다. 따라서 보다 현실적인 설계를 위하여 사고결과/영향 평가 평가자의 해석 능력, 경험 및 상식이 매우 중요하게 된다.

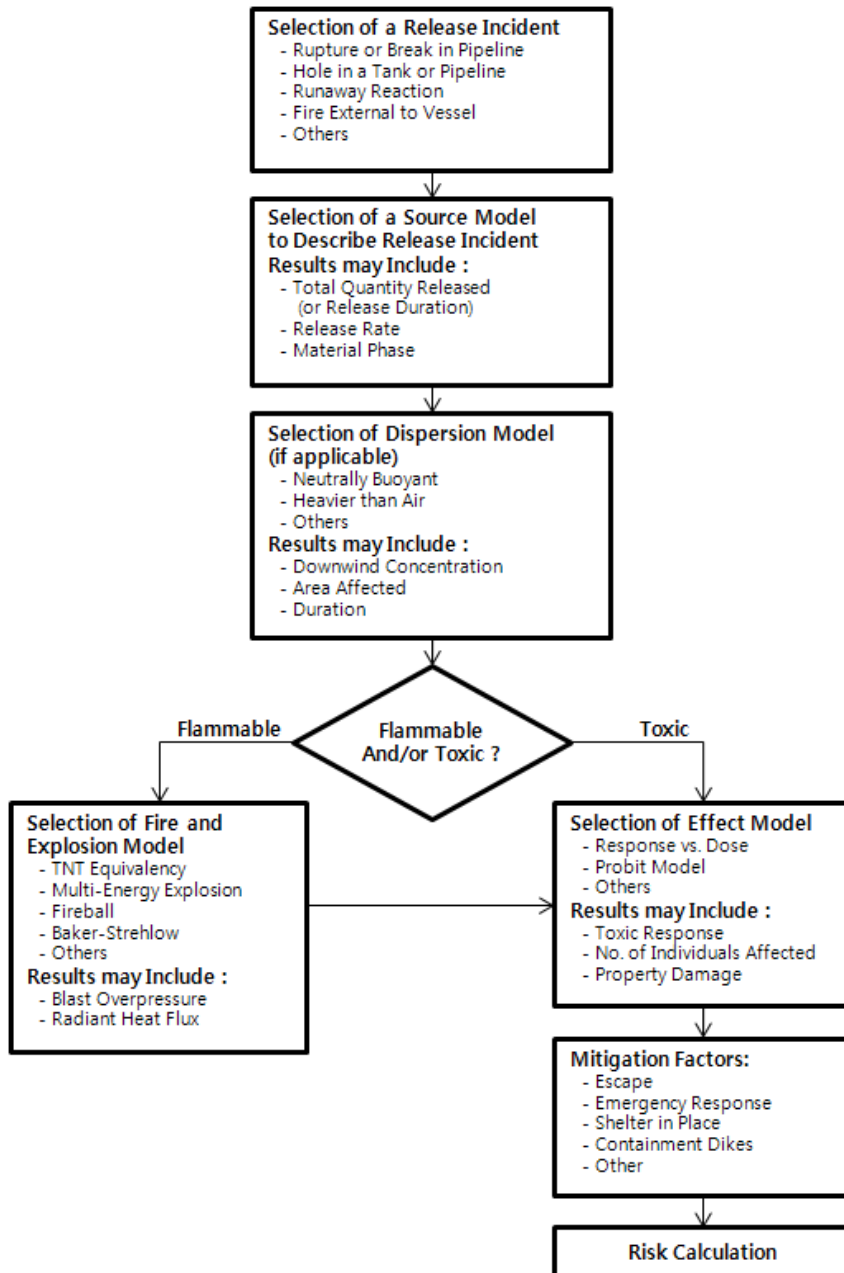


Figure 2-9 위험물질의 누출로 인한 사고결과/영향 분석 모델 흐름도

### 2.2.5 위험(도)의 표현 및 기준

사고빈도와 사고결과 및 영향 분석이 완료되면 그 수치를 이용하여 위험을 표현하여야 한다. 정량적 위험도 보편적으로 크게 2가지로 분류되며 그것은 개인적 위험도와 사회도 위험도이다. 개인적 위험도의 척도로서 가장 보편적으로 활용되는 개념은 개인적 위험 등고선(Individual Risk contour)이며 사회적 위험도의 척도로는  $F-N$  곡선이 있다[6].

개인적 위험도는 관점이 한 개인에 국한된 위험도를 말하며 위험주체로부터 규정된 결과가 보호되지 않은 개인에게 일어날 빈도이다[57]. 개인적 위험도는 특정 위치에 항상 거주하고 있다는 가정 아래 산출하는 위험도 location specific individual risk와 실질적인 점유율(거주율)을 고려한 individual specific individual risk으로 나누어지며 통상적으로 on-shore 플랜트에 대한 개인적 위험 표현은 전자를 활용한다. 이것을 구하는 산출 공식은 해당 지역에 미치는 모든 사고 경우로 인한 개인 피해(일반적으로 사망으로 규정) 빈도의 합으로서 다음과 같다

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^n IR_{x,y,i}$$

여기서

$IR_{x,y}$  = 지리적 위치  $(x,y)$ 에서 사망에 관한 총 개인적 위험도(연당 사망 빈도)

$IR_{x,y,i}$  = 사고결과 경우  $i$  로 인한 지리적 위치  $(x,y)$ 에서 개인적 위험도 (연당 사망 빈도)

$n$  = 분석에서 고려한 총 사고결과 경우 수



사고결과 경우별 사망빈도  $IR_{x,y,i}$ 는 QRA 의 사고결과 경우 및 영향 평가로 얻은 값을 활용하게 되는데, 사고결과 경우의 빈도와 영향 평가(effect) 모델을 통해 사망할 확률의 곱으로 표현된다.

$$IR_{x,y,i} = f_i \times p_{f,i}$$

여기서

$f_i$  = 빈도 분석에서 사고결과 경우  $i$ 의 발생빈도 (/yr)

$p_{f,i}$  = 사고결과 경우  $i$ 가 사고영향 모델을 통해 위치  $(x,y)$ 에서 사망을 야기할 확률이다.

또한  $f_i$  는 사고결과 경우  $i$ 를 포함하고 있는 사고빈도, 그 사고를 조건부로 한 사고결과 경우  $i$ 를 포함하고 있는 사고결과가 발생할 확률, 그리고 그 두 조건을 조건부로 한 각 사고결과 경우가 나올 확률의 곱으로 표현되고 산출 공식은 다음과 같다.

$$f_i = F_I \times p_{o,i} \times p_{oc,i}$$

여기서

$F_I$  = 사고결과 경우  $i$  를 사고결과 경우의 하나로 가지고 있는 사고  $I$  의 빈도 (/yr)

$p_{o,i}$  = 사고  $I$  가 발생될 때  $i$  를 그 사고결과 경우의 하나로 가지고 있는 사고결과가 발생할 확률

$p_{oc,i}$  = 사고  $I$  와 사고결과 경우  $i$  를 일으키는 사고결과가 발생했을 때 사고결과 경우  $i$ 가 발생할 확률

Table 2-6 정량적 위험 표현 형식

위험도	표현형식
<b>개인적 위험</b>	
개인적 위험 등고선	현지 지도 위에 동등한 위험 값의 폐쇄 곡선(Closed curve)을 첨가함
개인적 위험 Transect	명시된 방향의 플랜트에서 거리의 함수로 나타나는 개인적 위험의 그래프
최대 개인적 위험	최대 위험에 처한 사람에 해당되는 개인적 위험의 단일 숫자 값
평균 개인적 위험 (노출된 인구)	노출된 인구에서 사람과 평균 위험을 예측하는 단일 숫자 값
평균 개인적 위험 (전체 인구)	모든 사람의 위험 노출 여부에 관계없이 사전에 결정된 인구에서 개인과 평균 위험을 예측하는 단일 숫자 값
<b>사회적 위험</b>	
사회적 위험 곡선 (F-N 곡선)	N 또는 더 많은 사망, 피해나 노출 대 N, 사망수, 피해나 노출을 야기하는 사건의 축적 확률 또는 빈도의 그래프
<b>평균 사회적 위험</b>	평균 사망률에 대한 또 다른 용어

이렇게 구해진 개인적 위험도를 기반으로 여러 가지 응용 척도를 얻을 수 있는 데 Table 2-6은 그와 관련한 것을 예시하고 있다. 대표적인 것은 개인적 위험도 등고선과 평균 개인적 위험도이다. 위험 등고선은 설비를

중심으로 동일한 개인적 위험도 선을 나타낸 것이며 위험 지역에 대한 명확한 이해를 제공할 뿐만 아니라 연속적 사고인 도미노 효과에 대한 직관을 제공한다[6]. 평균 개인적 위험도는 위험에 노출된 각 사람들의 개인적 위험도의 합을 전체 노출 인구로 나눈 값으로 설비에 대한 개괄적 위험을 이해토록 해준다.

사회적 위험도 척도인  $F-N$  곡선은 관점이 개인이 아니라 공장처럼 피해를 주는 주체에 대한 위험도를 표시하는 척도이다. 이것은 횡축에는 피해자 수를 표시하고 종축  $F(N)$  은 규정된 피해자 수가  $N$ 보다 크거나 같은 사고를 낼 사고의 빈도의 모든 합을 타점한 것이다. 위험시설은 위험물질을 다량으로 생산, 취급하기 때문에 사고발생시 많은 사람에게 피해를 가져올 수 있다. 하지만 그 피해의 규모는 다양한 확률을 가진 사고 시나리오별로 또한 다양하기 때문에 하나의 값으로 나타낼 수 없고 결국에 피해 규모(일반적으로 사망자수)별로 사고 빈도를 타점할 수밖에 없다.  $F-N$  곡선을 구할 때는 인구 밀도가 가장 중요한 입력 데이터이며, 시간별 거주자 비율, 대피소, 차폐 효과 등 사고시 피해 인명수가 달라질 수 있는 모든 요소에 대해서 고려가 되어야 한다.

$F-N$  곡선을 얻기 위해서는 모든 사고결과 경우  $i$  로 인한 기대 피해자수( $N_i$ )를 다음과 같이 먼저 구해야 한다.

$$N_i = \sum_{x,y} P_{x,y} \times p_{f,i}$$

여기서

$P_{x,y}$  는 위치  $x,y$  에 있는 사람들의 숫자이고  $p_{f,i}$  는 사고결과 경우  $i$  발생시 사람이 죽을 확률이다.

그리고 모든 사고결과 경우  $i$  에 대하여 다음과 같이  $F_N$  는

$$F_N = \sum_i F_i \quad \text{단 여기서 } N_i \geq N \text{ 인 사고결과 경우의 } i$$

식을 통해 구한다. 이 값을  $N$  을 횡축으로 한 종축에 타점을 하면  $F-N$  곡선이 된다.

도출된 개인적 및 사회적 위험도 값과 평가의 기준을 비교하여 안전성 향상을 도모한다. 위험도 기준이 필요한 이유는 위험을 감소하는 것이 위험 관리의 기본적인 방향이나 위험도를 완전히 제거하는 것은 사업자 및 국가 입장에서는 사실상 불가능하기 때문이다. 즉 적정한 안전 수준을 지키도록 감독하되 무한 안전에 대한 부담을 덜어주기 위하여 위험도 기준이 필요하다. 개인적, 사회적 위험도 기준은 각각이 존재해야 하며 그 위험을 수용할 사회 공동체의 보편적 인명 존중 가치가 고려되어 설정이 된다. 예를 들어 연간 자동차 사고로 인한 사망률이 일반인들이 수용할 수 있는 또는 인정할 수 있는 위험이라 했을 때 그보다 낮은 기준으로 위험 기준을 설정하는 경우를 들 수 있다.

일반적으로 정량적 위험도 기준의 구성은 영국 HSE에서 채택한 유형, 즉 Figure 2-10과 같이 2개의 기준선을 이용하여 3개의 구역으로 설정하는 것이다[64, 98]. 첫 번째 영역은 최대 허용 위험도(maximum tolerable risk) 기준선 이상의 영역대로서 이유를 막론하고 절대적으로 넘어서지 말아야 할 위험 영역이다. 둘째 영역은 무시할 위험도(negligible risk) 기준선 이하의 영역으로서 더 이상 설비 운영자가 관심을 두지 않아도 될 위험도 영역이다. 셋째 영역은 (ALARP : As Low As Reasonable Practical) 영역으로서 허용 불가능 위험도와 무시할 위험도 기준 사이의 영역으로서 위험도를 낮추어야 하는 데, 다만 효율성(비용-효과)을 보고 판단해야 하는 구간이다. 일반적으로 산업계에서는 이러한 개인적 위험도 기준을 작

업자와 일반인들로 구분하는 데 그 이유는 작업자들은 그 시설을 잘 알고 있을 뿐만 아니라 실제적으로도 사고시 그 위험을 잘 회피할 수 있는 가능성이 있어 덜 보수적으로(낮게) 수립한다.

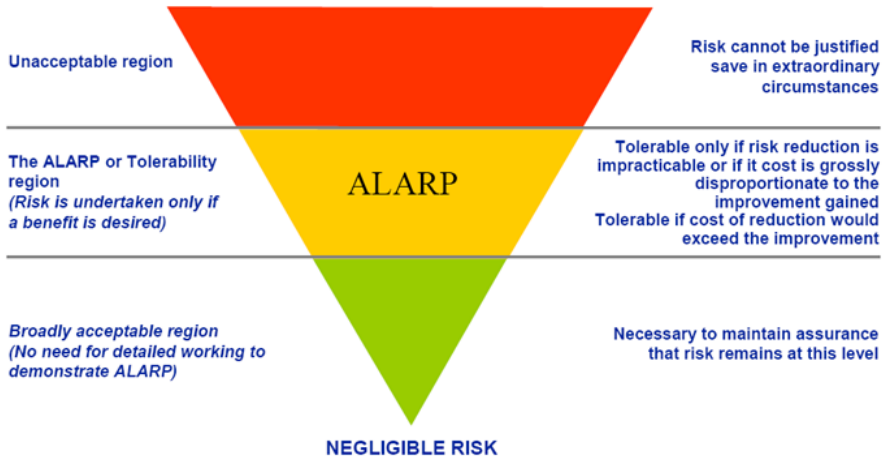


Figure 2-10 정량적 위험도 기준의 일반적 구성

Table 2-7은 해외 국가에서 규제기관들이 수립한 개인적 위험도 기준에 관한 조사 목록이다. 이것은 일반인들에 대한 기준이며 보는 바와 같이 가장 높은(완화된) 위험도 기준을 가진 나라는 영국으로서  $10^4/\text{yr}$  기준을 가지고 있다. 대체적으로  $10^5/\text{yr} \sim 10^6/\text{yr}$  사이 값을 기준으로 삼고 있는데 일반인들의 교통사고로 인한 위험도가 약  $1 \times 10^4/\text{yr}$  임을 감안하면 이 기준이 어느 정도인지를 감도할 수 있다.

Table 2-8은 해외의 기업들이 자발적으로 수립한 개인적 위험도 기준 (작업자)에 관한 조사 목록이다. 기업들이 가지는 개인적 위험도 기준은 허용 못할 기준이 대체로  $10^3/\text{yr}$  적용하고 무시할 위험은  $10^5/\text{yr}$  를 적용한다.

Table 2-7 국가별 개인적 위험도 기준 사례

국가	개인적 위험도 기준(/yr)	관련규제(코드), 기관
영국	Maximum tolerable risk : $10^{-4}$ Broad acceptable : $10^{-6}$	- R2P2 (2001)[64]
네덜란드	<New plant> Maximum Tolerable to the public : $10^{-6}$ Negligible : $10^{-8}$ <Existing plant> Maximum Tolerable to the public : $10^{-5}$ Negligible : $10^{-8}$	Ministry of Transport, Public Works, and Water Management (V&M) : dangerous goods transports
브라질 San Paulo State	Maximum tolerable risk : $10^{-5}$ Broad acceptable : $10^{-6}$ Maximum tolerable risk : $10^{-4}$ (pipeline) Broad acceptable : $10^{-5}$ (pipeline)	San Paulo State Environmental Sanitary Technology Company (CETESB, 2000)[65]
호주	Sensitivity development : $5 \times 10^{-7}$ 주거지역 : $1 \times 10^{-6}$ 상업지역 : $5 \times 10^{-6}$ Open areas, 비산업적 지역 : $1 \times 10^{-6}$ 산업단지 : $50 \sim 100 \times 10^{-6}$	- Environmental Protection Authority of Western Australia (EPAWA, 2000) - HIPAP 4: Risk Criteria for Land Use Safety Planning (NSW, 2011)[66]
홍콩	Maximum tolerable risk : $10^{-5}$	
미국 캘리포니아	Maximum tolerable risk : $10^{-5}$ Negligible : $10^{-7}$	

Table 2-8 기업별 개인적 위험도 기준 사례

기업	Individual risk criteria(fatality/year)	비고
영국 기업	Maximum tolerable risk : $10^{-3}$ Negligible : $10^{-6}$	HSE
Shell	Maximum tolerable risk : $10^{-3}$ Negligible : $10^{-6}$	Onshore and offshore
BP	Maximum tolerable risk : $10^{-3}$ Negligible : $10^{-5}$	Onshore and offshore
Norsk Hydro	Maximum tolerable risk : $10^{-3}$	Onshore plant
ICI	Negligible : $3.3 \times 10^{-5}$ (FAR =2)	Onshore plant
Statoil	Negligible : $8.8 \times 10^{-5}$ (FAR =5)	Onshore plant
Rohm& Haas	Negligible : $2.5 \times 10^{-5}$	Onshore plant
Fatal Accident Rate (FAR) : 치명적 사고율 - $10^8$ 노출 시간당 사망자 수 즉, 약 1000명의 근로자가 50년 동안 연간 2,000시간씩 일할 때, 그 중에 사망자 수		

사회적 위험도 척도인  $F-N$  곡선에 있어 위험도 기준은 선으로 표현하게 되며 일반인만을 대상을 하는 것이다.

사회적 위험도 기준의 일반적 구성은 anchor point에서 일정한 기울기 (slope)를 가지는 직선을 긋는 방식이며 그 점은 사고 기록들을 기반으로

특정 인원수 이상의 사망자(또는 규정된 피해)수가 발생하는 사고빈도가 초과하지 말아야 할 기준점이 된다. 기울기는 위험회피(risk aversion)에 관한 경향으로서 -1 인 경우는 위험회피를 하지 않는다는 것이고 -1 보다 작은 경우는 손실이 커지 것에 대한 위험회피를 하겠다는 의미(의도)가 된다. Figure 2-11 부터 2-14까지는 조사된 국가들에 대한 사회적 위험 기준이다. 영국은 다른 국가에 비해 상대적으로 완화된 기준을 가지고 있다. 네덜란드 위험도 기준과[9, 12, 67] 체코의 위험도 기준[68]은 세계적으로 가장 엄격하며 slope 가 -2로서 위험회피에 대한 강력한 의도가 있다. 다만 네덜란드는 10명 이상의 사망자가 발생하는 위험 주체에 대해서만 위험도 기준을 적용하는 특징이 있다. 홍콩의 기준은 국제 사회의 보편적 기준(Starting at  $(N=1, F(N) = 10^{-3}/\text{yr})$ , 기울기 = -1)이라 볼 수 있다. 특이하게도 1,000명 이상 사상자가 날 수 있는 공장에 대해서는 수직 cut off 라인이 있으며 그 의미는 1,000명 이상이 사망할 수 있는 위험 공장은 사고빈도가 아무리 낮더라도 절대 허용하지 못한다는 의미가 된다. 아직 우리나라의 석유화학 안전규제기관에서는 개인적, 사회적 위험도 기준을 제시하지 않고 있으며 다만 천연가스 매설배관에 대한 사회적 위험도 기준이 있는데 이것은 가스안전공사 내부 지침으로서 Figure 2-15와 같다.



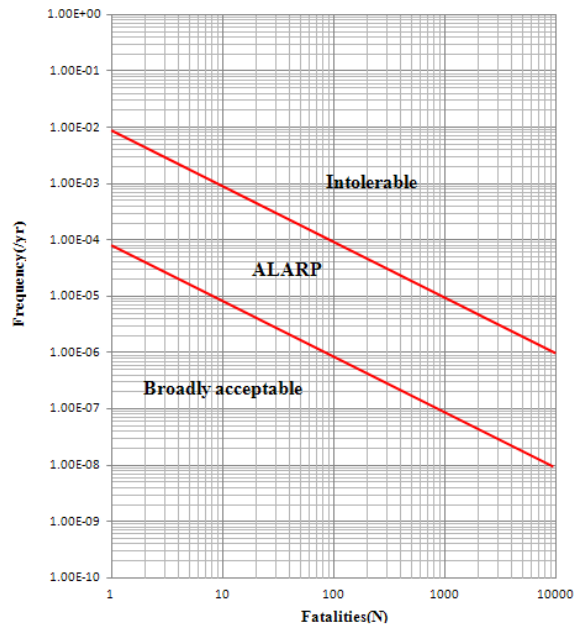


Figure 2-11 영국 사회적 위험도 기준

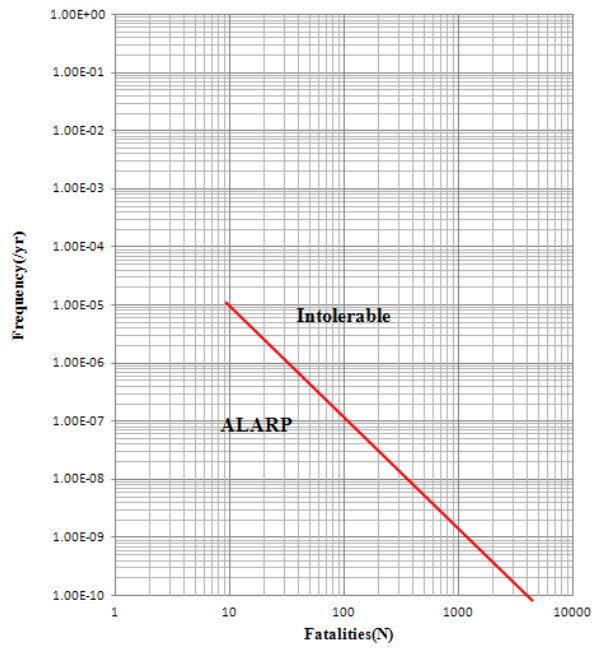


Figure 2-12 네덜란드 사회적 위험도 기준

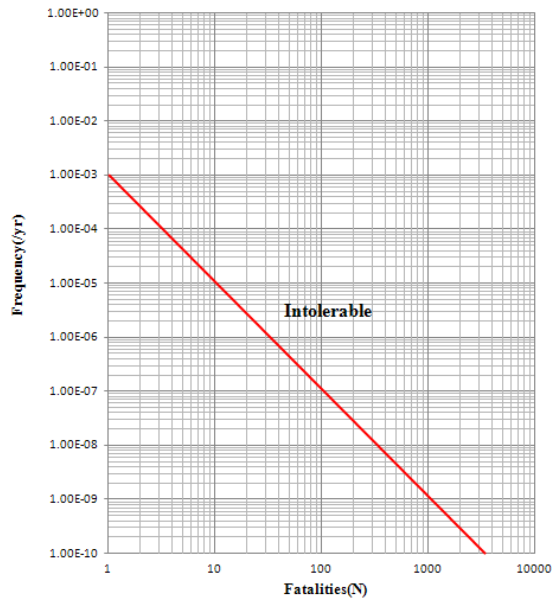


Figure 2-13 체코 사회적 위험도 기준

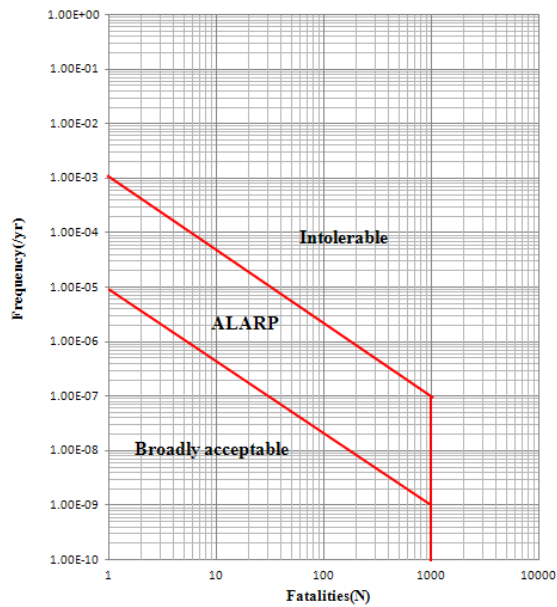


Figure 2-14 홍콩 사회적 위험도 기준

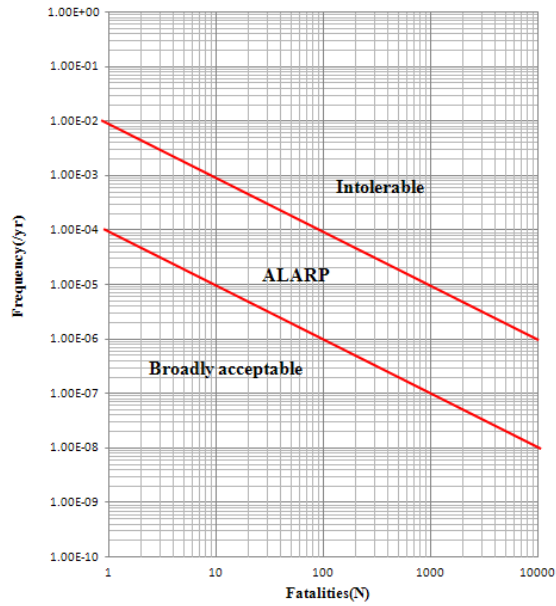


Figure 2-15 한국 가스안전공사 사회적 위험도 기준

### 3. 정량적 위험성 평가 적용/연구 현황 및 문제점

3장에서는 공정산업에서의 물질 관련 위험요소 관리의 중요성, QRA 적용 및 연구 동향, 효율적/실행적 측면에서의 QRA 기존 방법론의 문제점에 대하여 논하였다.

#### 3.1 공정산업에서 물질 위험요소의 중요성

QRA는 만성(Chronic) 위험요소보다는 급성(Acute) 위험요소에 대한 평가가 주 관심사이다. 후자가 공정산업에서 보다 중요하게 고려되는 이유는 한 번의 누출 사고로 인해 대규모의 인명피해와 자산 손실을 낳기 때문이다. on shore 산업에서의 Flixborough (1974), Seveso (1976), Bhopal (1984), Philips Pasadena (1989) 사고와 off shore에서의 Alexander Kielland (1980) and Piper Alpha(1988) 등은 그 대표적인 예들이다[69]. 이와 관련하여 최근 안전관리 및 기술의 발전, 규제의 성공적 수행으로 인하여 사고율이 감소한다고 보고한 사례[70]가 있다. 하지만 축적된 사고 데이터베이스, 즉 유럽의 MARS와 미국의 RMP-Star를 분석한 결과에서는 사고율의 실질적 감소는 없다는 연구[71] 결과가 있으며 공정산업의 양적 증가와 인구 증가와 맞물려 계속 증가할 것이라는 주장[72]도 있다.

이와 관련하여 한국의 공정산업에서의 사고사례 분석을 통해 그 경향을 살펴보았다. Table 3-1은 한국 공정산업에서 2002년부터 2008년까지 발생한 중대재해(대통령령이 정하는 유해, 위험 설비로부터의 위험물질의 누출, 화재, 폭발 등으로 인하여 사업장내의 근로자에게 즉시 피해를 주거나 사업장 인근지역에 피해를 줄 수 있는 사고)에 대한 한국의 KOSHA 보고

서[73]를 정리한 결과이다. 사망자가 발생한 총 사고 건수 136건 가운데 45건이 위험물질 누출로 인한 사고(화재, 폭발, 독성물질)와 관련되어 있는데 다른 원인들과 비교했을 때 그 비율이 33%로서 상대적으로 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 이것은 위험물질 위험관리에 대하여 여전히 높은 관심을 두어야 함을 의미한다. 반면 Figure 3-1과 같이 연도별 그래프에서 사망 사고건수는 감소 상태에 있는데 이것은 매우 고무적인 현상으로서 PSM(Process Safety Management) 제도가 보다 지속적으로 이루어져야 함을 의미하고 있다.

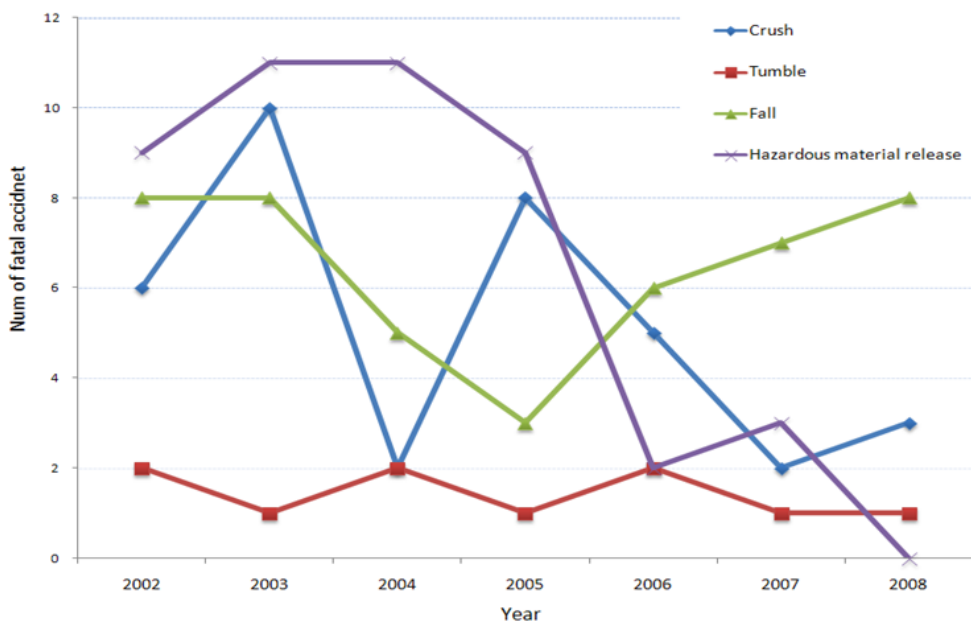


Figure 3-1 연도별 중대재해 중 사망 사고 건수 변화

Table 3-1 2002 ~ 2008 중대재해(재해 유형별) 사고 건수

연도	2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		총계		비율	
사고 유형	상해	사망	상해	사망	상해	사망	상해	사망	상해	사망	상해	사망	상해	사망	상해	사망	상해	사망
협착	389	6	378	10	467	2	385	8	352	5	335	2	289	3	2,595	36	35%	26%
전도	344	2	543	1	622	2	573	1	522	2	429	1	429	1	3,462	10	46%	7%
추락	145	8	211	8	219	5	148	3	120	6	90	7	140	8	1,073	45	14%	33%
화재, 폭발, 독성 물질 누출	48	9	73	11	46	11	61	9	39	2	34	3	32	0	333	45	4%	33%
소계	926	25	1,205	30	1,354	20	1,167	21	1,033	15	888	13	890	12	7,463	136		

본 논문에서는 실제 산업 현장에서 위험물질 위험요소에 대하여 어느 정도로 중요하게 인식하고 있는 지를 분석하여 그 중요성을 확인해보았다. 그를 위해 한국의 천연가스 산업분야 종사자들이 작업안전분석을 위하여 축적해놓은 직무 위험요소 인벤토리[74]에서 추출한 데이터 약 4,000개를 주요 위험 유형별로 그 비율을 분석하고 그 결과를 Table 3-3과 같이 정리하였다. 여기서 제시된 사전 위험도(pre-risk)는 Table 3-2에서 정의한 바와 같이 기존의 위험도 개념과는 다른 것으로서 작업안전분석 결과를 위험요소 체크리스트로서 활용하기 위해 새롭게 만든 개념이다. 일반적으로 위험도는 사고 심각성과 통제가 실패한 경우를 고려한 사고 가능성을 조합하여 표현하게 되는데 통제책(safeguard)이 없다는 전제하에 사고 가능성을 고려한 위험도를 산정해놓으면 결국 중점적으로 관리해야 할 직무를 확인하는 데 매우 유용하다.

이러한 위험등급을 근거하여 산정한 결과에서 중급(medium) 이상의 비율이 가장 높은 것은 위험물질로 인한 위험요소로 나타났다. 따라서 그에 대한 안전 관리의 중요함이 다시 확인되었다.

위와 같은 분석 결과들과 역사적 사고 기록들을 봤을 때 공정산업에서 물질 누출 방지와 그로 인한 위험 경감을 위해 필요한 위험성 평가가 여전히 매우 중요하다는 결론을 얻을 수 있다.

Table 3-2 한국 천연가스 산업 작업 위험도 분석 매트릭스

심각도 분류			사건 가능성(pre-likelihood) 분류		
수준	인명 손실	경제적 손실	수준		
			1	2	3
			$\geq 10\%$	1 ~ 10%	Very rare
A	다수의 중상자	$\geq \$30,000$	High	High	Medium
B	다수의 경상자	\$10,000 ~ \$30,000	High	Medium	Low
C	경상	$< \$10,000$	Medium	Low	Low
<p>&lt;정의&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Severity: 확인한 위험요소로 인한 사고 발생시 재산/인명 손실의 심각도</li> <li>- Pre-Likelihood: 통제책이 적용되지 않았다고 가정할 때의 사고 발생 가능성(도)</li> <li>- Pre-Risk: 제책이 적용되지 않았다고 가정할 때의 위험성(도)</li> </ul>					



Table 3-3 한국 천연가스 산업 작업장에서의 직무별/위험유형별 위험도 비율

직무 위험요소	심각도			사전 가능성(pre-likelihood)			사전 위험도(pre-risk)			소계	비율
	A	B	C	1	2	3	High	Medium	Low		
전기로 인한 상해/사망	208	41	13	5	101	156	81	149	32	262	6%
	79%	16%	5%	2%	39%	60%	31%	57%	12%		
물질 누출로 인한 상해/사망 (예, 화재 폭발 등.)	402	188	160	27	250	473	84	431	235	750	18%
	54%	25%	21%	4%	33%	63%	<u>11%</u>	<u>57%</u>	31%		
물리적 충격으로 인 한 상해/사망 (예, 추락 등)	719	635	850	236	1075	893	333	928	943	2,204	54%
	33%	29%	39%	11%	49%	41%	15%	42%	43%		
운전 문제 (예, 공정 중단)	83	90	83	11	106	139	29	108	119	256	6%
	32%	35%	32%	4%	41%	54%	11%	42%	46%		
설비 손상/파손	67	188	135	40	137	213	42	116	232	390	10%
	17%	48%	35%	10%	35%	55%	11%	30%	59%		
기타	81	72	57	31	93	86	53	75	82	210	5%
	39%	34%	27%	15%	44%	41%	25%	36%	39%		
총계										4072	

## 3.2 QRA 적용 및 연구 현황

이 절에서는 석유화학 및 에너지 산업과 관련하여 한국의 글로벌 EPC(Engineering, Procurement, Construction) 사업자 A 사를 대상으로 최근 8년간(2004년~2011년) 수행한 25 프로젝트 자료를 수집하여 QRA 와 SIL(Safety Integrity Level)의 적용 동향을 고찰함으로써 정량 위험분석의 중요성을 확인해보았다. 또한 최근 관련 QRA 연구 동향과 방법에 대하여 논하였다.

Figure 3-2는 언급한 기업에서 수행한 프로젝트들에 대한 분석 결과로서 2007년 전 후 기준으로 QRA는 43%에서 78%로 그 비율이 높게 증가했음을 알 수 있다. 또한 석유 및 가스 플랜트와 화학 플랜트를 구분했을 때도 그 증가 비율은 유사함을 알 수 있으며 이를 통해 모든 공정산업에서는 이미 초기 건설단계에서 (Full) QRA를 보편적으로 거의 적용한다는 사실을 알 수 있다. 특히 functional safety 측면에서 기능성 고장들의 연속적 사건들로 인한 사고에 관점을 두는 대표적 안전 기법인 SIL 기술이 100% 적용되는 것을 확인하였는데 이것이 갖는 시사점은 확률론적 평가가 기업의 안전 의사 결정에 있어 매우 중요한 기준이 되었음을 의미한다.

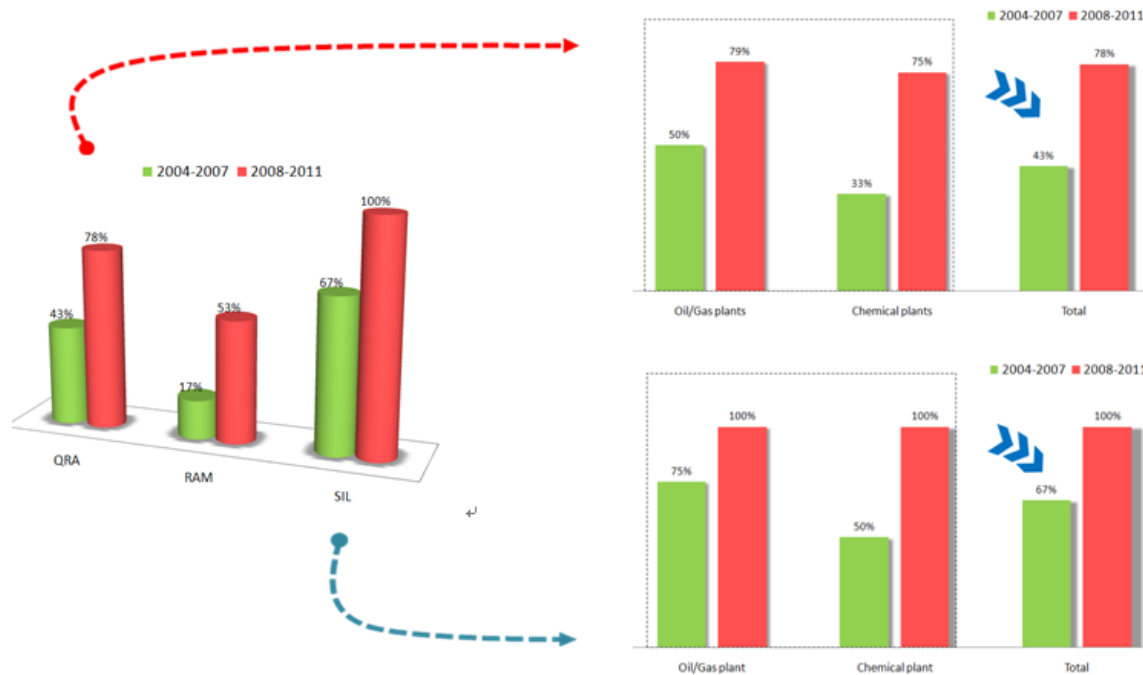


Figure 3-2 한국 글로벌 EPC 기업의 (Full) QRA 적용 비율 조사 결과

산업계의 이러한 실질적 변화와 더불어 학문적 측면에서의 위험성 평가 연구도 이러한 경향, 즉 정량적 위험 분석에 얼마나 초점을 두고 있는 지를 살펴보았다. 본 논문에서는 2010년에 P.K. Marhavidas 가 게재한 논문 “Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009”[75]에서 제시한 세계 6대 안전 논문지(Safety science(JSS), Journal of Safety Research(JSR), Accident Analysis and Prevention, Journal of Loss Prevention in the Process Industries(JLPPI), International Journal of Industrial Ergonomics, Reliability Engineering & System Safety(JRESS))에 수록된 404 편의 위험성 평가 논문에서 Table 3-4와 같이 공정산업과 연관되는 위험성 평가 논문 52편을 추출하여 그 접근 방법론을 분석하였다.

Figure 3-3에서 보는 바와 같이 전체적인 경향에서 정량적 분석이 차지하는 비율은 약 81%로서 절대적 높은 비중을 차지한다. 여기서 정량 분석 방법론을 5개로 분류하고 그 비율을 분석해 보았는데 사고빈도와 사고 결과 분석이 모두 포함된 (Full) QRA는 31%로써 사고결과 분야만을 수행한 비율과 동일한 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다.

QRA 연구에 대한 연도별 비율을 3년 간격으로 분석한 결과에서는 Figure 3-4에서 보는 바와 같이 (Full) QRA 관련 연구 비율은 점차 증가하고 있음을 알 수 있다.

이러한 산업계와 학계에 대한 QRA 동향을 살펴볼 때 향후 확률론적 위험 정량화 기술의 적용이 보다 확대되고 발전될 것은 명확하다.

Table 3-4 공정산업에 대한 위험성 평가 연구(논문) 접근 방법론 분석 결과

N	논문 제목	년도	논문지	접근 방법론 분류 1	접근 방법론 분류 2	위험 종류	분석 분류 1	분석 분류 2
1	Indicators to compare risk expressions, grouping, and relative ranking of risk for energy systems: Application with some accidental events from fossil fuels	2009	JSS	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	comparative/ relatvie	Quantitative	Full QRA
2	DomPrevPlanning: User-friendly software for planning domino effects prevention (Reniers & Dullaert, 2007)	2007	JSS	Software/System	suggesting new/modified method	comparative/ relatvie	Quantitative	Full QRA
3	Assessment of hazardous material risks for rail yard safety (Glickman & Erkut, 2007)	2007	JSS	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Full QRA
4	A systemic approach to effective chemical emergency management (Kourniotis, Kiranoudis, & Markatos, 2001)	2001	JSS	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Mainly consequence
5	Early hazard identification of chemical plants with statechart modeling techniques (Graf & Schmidt-Traub, 2000)	2000	JSS	Method/Applicat ion			Qualitative	
6	The cost and risk impacts of rerouting railroad shipments of hazardous materials (Glickman, Erkut, & Zschocke, 2007)	2007	JAAP	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Full QRA
7	A comparative analysis of mathematical models for relating indoor and outdoor toxic gas concentrations in accidental releases (Montoya, Planas, & Casal, 2009)	2009	JLPPI	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Only consequence
8	Risk-based maintenance strategy and its applications in a petrochemical reforming reaction system (Hu, Cheng, Li, & Tang, 2009)	2009	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Mainly frequency
9	Modeling the risk of failure in explosion protection installations (Date, Lade, Mitra, & Moore, 2009)	2009	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Mainly frequency
10	Applications of 3D QRA technique to the fire/explosion simulation and hazard mitigation within a naphthacracking plant (Yet-Pole, Shu, & Chong, 2009)	2009	JLPPI	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Mainly consequence
11	Comprehensive risk assessment and management of petrochemical feed and product transportation pipelines (Gharabagh et al., 2009)	2009	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	comparative/ relatvie	Quantitative	Full QRA
12	Numerical simulation on the diffusion of hydrogen due to	2009	JLPPI	Method/Applicat	suggesting	absolute	Quantitative	Only

	high-pressured storage tanks failure (Liu, Hwang, et al., 2009; Liu, Guo, et al., 2009; Liu et al., 2009)			ion	new/modified method			consequence
13	Numerical analysis of release, dispersion and combustion of liquid hydrogen in a mock-up hydrogen refueling station (Baraldi, Venetsanos, Papanikolaou, Heitsch, & Dallas, 2009)	2009	JLPPI	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Only consequence
14	A hazard and operability analysis method for the prevention of misoperations in the production of light magnesium carbonate (Wang, Gao & Guo, 2009)		JLPPI	Method/Applicat ion			Qualitative	
15	Risk assessment of LNG importation terminals using the BayesianLOPA methodology (Yun, Rogers, & Mannan, 2009)	2009	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only frequency
16	Numerical simulation of hydrogenebair detonation for damage assessment in realistic accident scenarios (Bédard-Tremblay, Fang, Bauwens, Cheng, & Tchouvelev, 2008)	2008	JLPPI	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Only consequence
17	A quantitative risk-assessment tool for the external safety of industrial plants with a dust explosion hazard (van der Voort et al., 2007)	2007	JLPPI	Software/System	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Full QRA
18	Numerical analysis of hydrogen deflagration mitigation by venting through a duct (Makarov, Verbecke, & Molkov, 2007)	2007	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only consequence
19	An application of 3D gas dynamic modeling for the prediction of overpressures in vented enclosures(Karnesky, Chatterjee, Tamanini, & Dorofeev, 2007)	2007	JLPPI	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Only consequence
20	Numerical analysis of gas explosion inside two rooms connected by ducts (Hashimoto & Matsuo, 2007)	2007	JLPPI	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Only consequence
21	Model-based HAZOP study of a real MTBE plant (Labovský et al., 2007)		JLPPI	Method/Applicat ion			Qualitative	
22	Operational risk assessment of chemical industries by exploiting accident databases (Meel et al., 2007)	2007	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only frequency
23	Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines (Dziubi nski, Fra,tczak, & Markowski, 2006)	2006	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Full QRA
24	A matrix-based risk-assessment approach for addressing linear hazards such as pipelines	2006	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified	absolute	Quantitative	Full QRA

					method			
25	A fuzzy set analysis to estimate loss intensity following blast wave interaction with process equipment (Salzano & Cozzani, 2006)	2006	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Mainly frequency
26	A simple model for calculating chlorine concentrations behind a water spray in case of small releases (Dandrieux-Bony, Dimbour, & Dusserre, 2005)	2005	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only consequence
27	Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault-tree analysis (Yuhua & Datao, 2005)	2005	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only frequency
28	Calculating overpressure from BLEVE explosions (Planas-Cuchi, Salla, & Casal, 2004)	2004	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only frequency
29	Comparison of techniques for accident scenario analysis in hazardous systems (Nivolianitou, Leopoulos, & Konstantinidou, 2004)	2004	JLPPI	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Only frequency
30	Loss prevention in heavy industry: risk assessment of large gasholders (Bernatik & Libisova, 2004)	2004	JLPPI	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Full QRA
31	Risk analysis as a basis for safety management system (Demichela, Piccinini, & Romano, 2004)	2004	JLPPI	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Only frequency
32	Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning (Khan & Haddara, 2003)	2003	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Mainly frequency
33	Safety analysis and risk assessment in a new pesticide production line (Rigas, Konstandinidou, Centola, & Reggio, 2003)	2003	JLPPI	Method/Applicat ion	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Full QRA
34	Technical modeling in integrated risk assessment of chemical installations (Papazoglou, Aneziris, Post, & Ale, 2002)	2002	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Mainly frequency
35	Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines (Jo & Ahn, 2002)	2002	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only consequence
36	A methodology for assessing risk from released hydrocarbon in an enclosed area (Lee, 2002)	2002	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only consequence
37	Evaluation of limits for effective flame acceleration in hydrogen mixtures (Dorofeev, Kuznetsov, Alekseev, Efimenko, & Breitung, 2001)	2001	JLPPI	Method/Applicat ion	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only consequence

38	A procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels (Hauptmanns, 2001)	2001	JLPPI	Method/Application	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only consequence
39	Analytical expressions for the calculation of damage percentage using the probit methodology (Vílchez, Montiel, Casal, & Arnaldos, 2001)	2001	JLPPI	Method/Application	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only consequence
40	Risk analysis of a typical chemical industry using ORA procedure (Khan & Abbasi, 2001)	2001	JLPPI	Method/Application	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Full QRA
41	Risk analysis of LPG transport by road and rail (Bubbico, Ferrari, & Mazzarotta, 2000)	2000	JLPPI	Method/Application	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Full QRA
42	A systematic Hazop procedure for batch processes, and its application to pipeless plants (Mushtaq & Chung, 2000)		JLPPI	Method/Application			Qualitative	
43	An optimizing hazard/risk analysis review planning (HARP) framework for complex chemical plants (Reniers, 2009)		JLPPI	Method/Application			Qualitative	
44	Qualitative models of equipment units and their use in automatic HAZOP analysis (Bartolozzi, Castiglione, Picciotto, & Galluzzo, 2000)		JRESS	Method/Application			Qualitative	
45	Integration of interlock system analysis with automated HAZOP analysis (Cocchiara, Bartolozzi, Picciotto, & Galluzzo, 2001)		JRESS	Method/Application			Qualitative	
46	Risk assessment of LPG automotive refueling facilities (Melchers & Feutrill, 2001)	2001	JRESS	Method/Application	utilizing existing method	absolute	Quantitative	Full QRA
47	Risk analysis in plant commissioning: the Multilevel Hazop (Cagno, Caron, & Mancini, 2002)		JRESS	Method/Application			Qualitative	
48	Optimal maintenance decisions under imperfect inspection (Kallen & van Noortwijk, 2005)	2005	JRESS	Method/Application	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only frequency
49	Identification of reference accident scenarios in SEVESO establishments (Delvosalle et al., 2005)		JRESS	Method/Application			Qualitative	
50	On the use of the hybrid causal logic method in offshore risk analysis (Røed, Mosleh, Vinnem, & Aven, 2009)	2009	JRESS	Method/Application	suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only frequency
51	An automated system for batch hazard and operability studies (Palmer & Chung, 2009)		JRESS	Software/System			Qualitative	
52	I-Risk: development of an integrated technical and management risk methodology for chemical installations	2003	JLPPI		suggesting new/modified method	absolute	Quantitative	Only frequency



방법론	세부 방법론	논문 개수	소계	비율
정성적 위험성 평가		9	10	
		1		
정량적 위험성 평가	Full QRA	13	42	31%
	Mainly consequence	2		5%
	Only consequence	13		31%
	Mainly frequency	5		12%
	Only frequency	9		21%

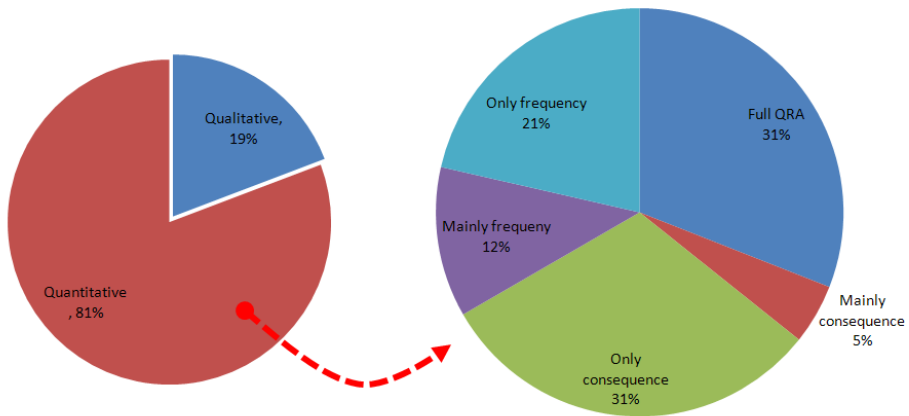


Figure 3-3 공정산업 위험성 평가 연구 방법론 비율

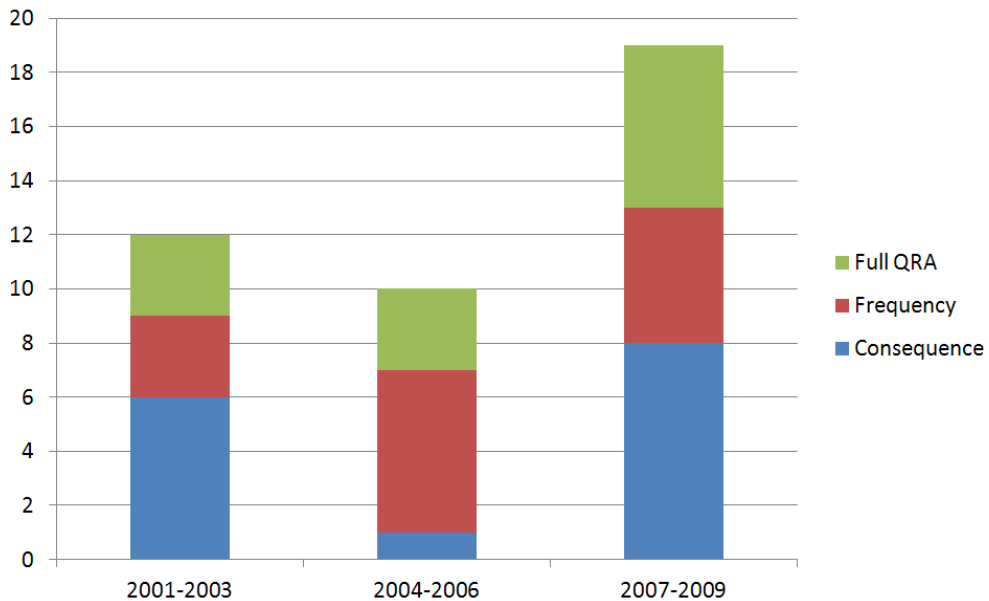


Figure 3-4 위험성 평가 방법론 분류별/연도별 연구 논문 개수

그러나 아직까지는 안전 및 공정 정보(지식)의 복잡성 및 방대함 등의 이유로 인하여 사고빈도 분석이나 결과분석 분야에 치우친 QRA 연구가 주를 이루고 있다. 특히 실행적, 관리적 차원에서 QRA의 효율성, 협력성, 지속성을 향상하는 방법론 또는 모델에 대한 기존 연구 사례는 매우 희박한 실정이다. 즉 과거 연구는 주로 분석적/해석적 측면에서 새로운 방법을 제안하거나 응용하는 것에 집중되어 있다.

이와 관련하여 효율과 협력 측면에서의 QRA 방법론에 관한 기존 연구와 문헌을 고찰한 결과는 다음과 같다.

효율적 측면에서 QRA 절차를 제안한 연구로는 대표적으로 Khan과 Abbasi가 제안한 ORA(optimum risk analysis) 체계가 있다[6]. 이것은 QRA 절차를 1) 위험요소 확인 및 스크리닝 2) 위험요소 평가(정성적과

정량적) 3) 위험요소 정량화 또는 사고결과 분석 그리고 4) 위험 분석으로 구분한 것이다. 궁극적으로 저비용, 비교적 짧은 시간에 QRA를 기존 방법 대비 정확성을 유지하면서 수행하는 것에 목적을 둔 방법이다. 여기서 위험요소 확인 및 스크리닝 단계는 가장 분석 시간 단축에 영향을 주는 단계로 파악되며 공정 물질, 운전 특성들에 기반한 다중 속성 hazard (multi-attribute hazard)를 고려하여 신속하게 분석 위험요소를 찾는 것이 특징이다[47].

또한 Khan과 Abbasi는 분석 시스템/프로그램 측면에서 신속하게 분석할 수 있도록 하는 프로그램을 개발하였는데 석유 정유 산업에 대해서는 TORAP(TOol for Rapid risk Assessment in Petroleum refinery and Petrochemical industries)[26]을, 화학 공정에 대해서는 MAXCRED[72]을 개발하여 적용한 바가 있다[51]. 이 시스템들은 분석자가 설정한 물질 정보, 운전 조건, 설비 사양에 기반을 두고 신뢰할만한(credible) 한 사고결과 시나리오를 도출하는 것을 자동화함으로써 분석 시간을 줄이고자 하였다. 하지만 위험의 표현을 위해서 결국 필요한 사고빈도 값은 전문가가 독립적으로 분석해서 설정을 해야 한다.

또한 Khan은 사고빈도 분석의 주요 방법론인 fault tree 분석을 신속히 하기 위한 AS-II라고 명명한 방법을 제안하였다. 이것은 부울 행렬(boolean matrix)과 퍼지 셋(fuzzy set) 이론을 기반으로 하여 optimal cut set을 구하는 방법[58]으로서 기본사상이 많은 fault tree에서 비교적 기존 해석 방법보다 신속하다고 하였다.

Frank J 등은 관리자와 엔지니어들이 위험 모델과 결과를 쉽게 이해하도록 하기 위하여 사고 시나리오의 표현에 있어 event sequence diagrams (ESD)를 이용하여 event tree를 대체하는 QRAS 라는 시스템을

개발하였다[76]. 하지만 이것은 NASA 우주 프로젝트와 관련한 확률론적 해석만을 하는 도구로서 공정 산업의 사고빈도 분석과는 차별성이 있다.

Reniers와 Dullaert는 도미노 영향을 최소화하기 위하여 설비들의 순서에 따른 위험도를 수치화할 수 있는 사용자 편의 소프트웨어를 개발 적용한 바[77]가 있으나 이것은 상대적 순위를 이용하는 것으로 통상적 정량적 위험성 평가는 아니다.

김은 사고결과 분석에 필요한 시나리오를 전문가의 도움없이 쉽게 추론할 수 있는 방법론을 제시한 바가 있다[78]. 이것은 공정 unit, 물질, 단위 장치에 대한 정보를 포함하는 knowledge base 와 4개의 추론 알고리즘을 이용하여 분석 대상이 될 가상 사고 시나리오를 합성하는 방법론으로서 사고영향 평가의 신뢰성을 높이하고자 하였다.

상업적 측면에서도 QRA를 보조하기 위한 많은 소프트웨어/프로그램들이 개발되고 있다. 이와 관련하여 Lewis 는 "in-house" 프로그램을 제외한 전 세계 80개 시스템을 조사하고 그 중에서 유효성, 편리성, 품질, 지속적 개선 항목에 맞추어 평가한 결과에서 결과분석 전용 시스템 18개, 빈도분석 전용 16개 시스템, 그리고 6개의 QRA 시스템이 선도한다고 보고했다[27]. 하지만 Table 3-5에서 보는 바와 같이 on shore 에 대한 QRA 소프트웨어는 6개 정도로 소수이며 이 중에서 다른 분석 프로그램과 연계되지 않고 독자적으로 계산하는 것은 SAFETI(PHAST-RISK)[97]와 SHEPHERD가 유일하다고 하였다. 이러한 기존 연구 및 상업적 측면에서 개발된 QRA 시스템들의 전반적 활용 체계는 모두 Figure 3-5와 같이 구성되어 있으며 TORAP 시스템처럼 사고빈도는 별도 분석을 통해 입력되는 구조이다. 결론적으로 아직까지 사고빈도와 결과분석을 통합하여 개발된 도구(시스템/소프트웨어)는 없다.

Table 3-5 전 세계 QRA 관련 프로그램/시스템 목록

대분류	소분류	프로그램/시스템 명
CONSEQUENCE	EMPIRICAL MODELS	FRED PHAST TRACE CIRRUS EFFECTS CANARY HAZ
	PHENOMENOLOGICAL MODELS	SCOPE
	CFD MODELS	KAMELEON/ KAMELEON FIREX FLACS AUTOREAGAS CEBAM EXSIM**
FREQUENCY	FAULT TREE ONLY	FT PROFESSIONAL CABTREE FAULTREASE
	EVENT TREE ONLY	RISKMAN DDMT
	FAULT & EVENT TREE	CARA FAULT TREE+ PSA PROF RISKSPECTRUM FAULT TREE & EVENT TREE LOGAN F&ETA SAPHIRE CAFTA
	BLOWOUT FREQUENCY MODELLING	BLOWFAM
	LEAK FREQUENCY MODELLING	LEAK
	SHIP COLLISION MODELLING	COLLIDE CRASH
QRA	OFFSHORE QRA	NEPTUNE PLATO
	ONSHORE QRA - , "INTEGRATED"	SAFETI(PHAST-RISK) SHEPHERD
	ONSHORE QRA - S "NON-INTEGRATED"	RISKCURVES + EFFECTS + DAMAGE RISKPLOT

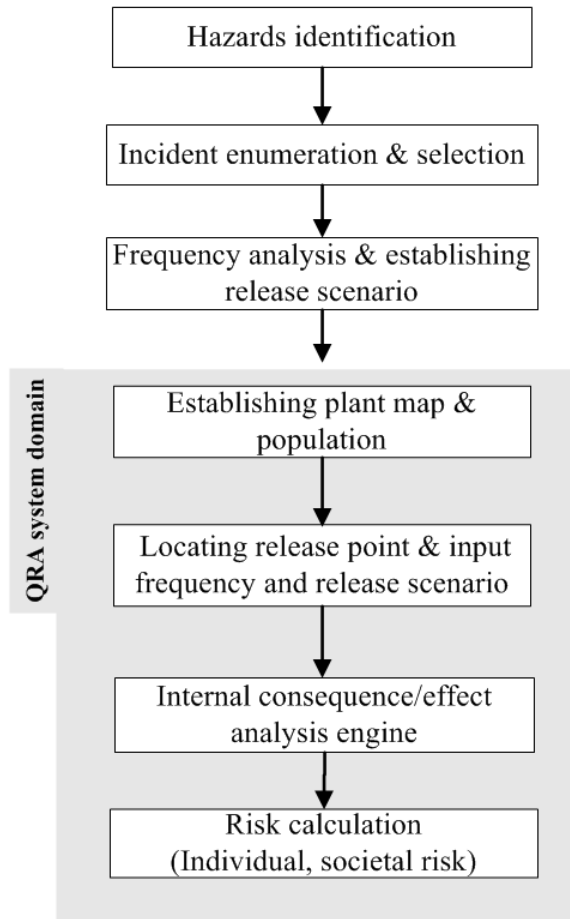


Figure 3-5 기존 (Full) QRA 시스템을 이용한 분석 흐름도

### 3.3 기존 위험 정량화 방법 및 체계의 문제점

정량적 위험 분석이 위험관리 체계에 효과적으로 내포되고 보다 적용이 활성화되기 위해서는 해석적 측면과 더불어 관리적, 실행적 측면에서의 새로운 모델이 제시되어야 한다. 여기서 새로운 모델이란 위험관리 체계의 필수적 과정인 내부 및 외부 이해관계자들이 상호간에 위험요소 확인 및 평가하는 과정 그리고 그 결과에 대한 이해, 소통이 정량적 평가에 있어서도 효과적으로 진행될 수 있는 체계를 말한다. 하지만 기존의 정량적 위험성 평가 방법론 연구는 주로 수치적/해석적 관점에서 새롭거나 수정된 방법 제안에 집중되어 있다. 또한 효율성과 관련한 기존 연구에서도 분석 절차 및 방법론에 관점이 있을 뿐 관리적, 실행적 측면에서 위험성 평가를 효과적으로 지원하기 위한 체계나 방법에 대한 연구는 희박하다.

이와 같은 체계(모델)의 부재와 위험성 평가의 본질적 한계가 중합되어 QRA에 대한 가치가 인정되면서도 산업계 현장에서는 좀 더 적극적으로 활용되지 못하고 있다. 총론적으로 위험관리 프로세스에 QRA를 순환적 위험성 평가 도구로 두기 어려운 이유를 정리하면 다음과 같다.

- 엔지니어, 안전관리자, 설비관리자 등 위험에 기반한 의사 결정시 가장 핵심적 보드의 이해관련자들은 위험성 평가 개념을 잘 이해하고 있어야 한다[93]. 하지만 신뢰성 공학, 유체역학, 화학공학적 모델 등으로 구성된 QRA 여러 요소 기술 사항에 대하여 실질적으로 모두 이해하는 것은 현실적으로 어렵고 이로 인해 분석결과에 대해서도 쉽게 수긍하지 못하는 상태를 낳으며 결국 이것은 의사 결정 방법론으로 QRA가 수용되는 데 부정적 영향을 미치게 된다.

- 최근 상업적 측면 등 다양한 QRA 소프트웨어 및 방법론의 표준화, 누출 신뢰도 데이터베이스 발전 등으로 인하여 정량화 계산 부분에 대해서는 많은 발전이 있다. 하지만 QRA 결과를 얻기까지는 사고 생성, 선택, 모델 수립, 기후 데이터, 인구밀도 자료 수집 등 계산 외에 여러 세부 전문가들의 역할과 노력을 요구하고 이로 인해 분석 시간이 Table 3-6과 같이 오래 소요된다. 따라서 다양한 시점에서 정량화된 위험도를 의사 결정의 기준으로 삼을 경우 그 결과가 신속하게 도출되어야 하는데 이것을 위해서는 내부의 전문가 확대, 양성이나 여러 외부전문가를 두어야 하는 고비용을 유발하게 되고 결국 기업의 비용과 연계되어 수용하기 어려운 사항이 된다.
- QRA 분석 자체의 문제로 인한 적용의 한계가 있다. QRA는 전문가마다 다르게 분석 대상 시나리오를 수립할 가능성이 높는데 이는 위험도가 다르게 도출될 가능성이 높음을 의미한다. 또한 선택되어진 사고 시나리오가 동일할지라도 다른 신뢰도 데이터 적용과 다른 사고결과 분석 모델 적용으로 인한 차이가 날 수 있으며 특히 적용할 신뢰도 데이터가 부족한 경우 일반 신뢰도 데이터를 사용해야 하고 이것은 분석자 및 실행자 상호간에 불확실성을 유발하여 의사 결정을 매우 어렵게 한다.
- 현재까지 제시된 여러 방법론 및 패러다임, 평가 시스템을 검토해 본 결과 정량 위험 분석 정보를 효율적, 효과적 축적할 수 있는 시스템 모델이 제시된 바가 없다. 이것은 즉 한번 이루어진 위험분석 모델이 지속적인 발전이 되지 못하고 있음을 의미하고 이로 인해 기술 실행 및 안전관리 업무 측면에서 QRA를 수용하기 어렵게 만든다.



Table 3-6 정량적 위험성 평가 수준별 예상 인력 수요(출처 : CCPS)

분석 절차	Simple /Consequence CPQRA (person-week)	Moderate /Consequence CPQRA (person-week)	Complex /Risk CPQRA (person-week)
데이터 수집	0.5~1.5	2~4	4~8
위험요소 확인/ 누출 사고 선택	1~2	2~4	4~8
사고결과 분석	0.5~1	2~3	3~10
사고빈도 분석	0.5~1	0.5~2	3~20
위험 정량화	0.5~1	0.5~2	2~5
보고서 작업	0.5~1.5	2~4	2~8
총계	3.5~8	9~19	18~59
비고	최악 누출 시나리오 에 대한 대략적 사고 빈도 및 결과 분석 수행 수준	대표적 누출 시나리 오에 대한 사고빈도 및 결과 분석을 통한 위험도 분석 수준	정제되고 다양한 누출 시나리오에 대하여 상세한 위 험도 분석 수준

따라서 이러한 복합적 문제를 해결할 수 있는 협력성, 지속성(연속성), 상호 이해성 강화를 위한 QRA 체계 및 시스템 모델을 제시하는 것은 QRA의 활용성을 높이는 데 큰 원동력이 될 수 있다고 판단한다. 그것은 QRA에 필요한 여러 단계와 정보를 고려해 볼 때 분석의 분업화 모델이 가능하다는 아이디어에서 시작한다. 즉 위험모델 수립과정에서 주요 사고 경위 및 누출 시나리오 도출은 전문가가, 검토는 이해관계자(안전관리자, 엔지니어)들이 수행하고 수정해나가며 위험분석에 필요한 설비 및 운영 등에 대한 정보는 담당자(안전관리자, 설비관리자 등)들이 보조해나가면 효율인 분석이 가능하다는 판단이다. 본 논문에서는 이러한 기본 아이디어를 기반으로 새로운 QRA 분석 체계 모델과 상세한 시스템 설계안을 제시하였다.

## 4. 제안하는 방법론

### 4.1 기본 아이디어

언급했던 바와 같이 기존의 QRA 절차로는 위험관리의 기본적인 원칙을 지키기가 쉽지 않다. 즉 다양한 이해관계자들이 상호간에 유기적 관계와 협력을 통해 분석된 사고 시나리오를 이해하고 검토해나가며 QRA 결과를 적용할 수 없다. 당사자 또는 이해관계자들의 참여가 부족한 분석 결과는 동감을 이끌 수 없고 적용이 되질 않으며 그 가치가 저감된다[79]. 따라서 실행적 측면에서 새로운 분석 방법론과 시스템 모델이 필요하며 이를 위해 본 논문에서는 Figure 4-1에서 같이 위험확인, 분석, 평가 절차에 있어 협력적, 효율적 분석을 위해 어떤 구심점을 기반으로 한 QRA 체계를 제안한다. QRA를 완수하기 위해서는 여러 전문가들의 역할을 필요로 하는 데 각 고유 영역에 대한 역할을 최대화하고 상호간의 검토와 협력을 이끌 수 있는 구심점이 있다면 효율적이고 효과적인 분석이 가능하다고 판단한다. 궁극적으로 이러한 과정을 통해 얻어진 결과는 계량적 위험관리 실용화에 큰 기여를 할 것으로 판단한다.

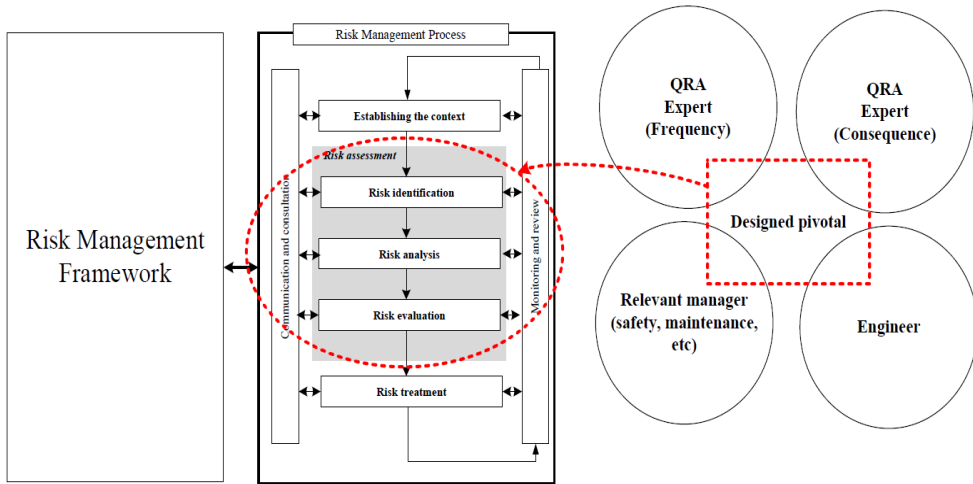


Figure 4-1 구심점 개요

이러한 구심점 기반의 계량적 위험 분석 체계를 구성하고 실현하는 데 있어 본 연구는 다음과 같은 사항에 주안점을 두었다.

#### 1) 사고 시나리오 정보를 체계적으로 내포한 구심점 연구와 그것을 통한 위험도 분석에 대한 상호 이해성(검토성) 상승

QRA 전문가를 제외한 분석 이해관계자 또는 관련담당자(예, 안전관리자, 운전원, 엔지니어 등)들은 보고서 기반의 빈도분석 및 사고결과 분석 모델과 정량적 위험도 결과를 통해 평가 과정을 이해하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 이런 점을 극복하기 위해서는 이해의 수준을 좀 더 높일 수 있는 새로운 체계를 구성해야 하는 데 본 연구에서는 사고 시나리오 부분에 대한 이해도를 높이는 방법론 연구에 주안점을 두었다. 그것은 대부분 QRA 비전문가들은 HAZOP, FMEA와 같이 시나리오 방식으로 전개된 위험 정보에 대해서는 익숙하다는 점에 착안하여 연구하는 것이다. 따라서 이런 점을 고려한 구심점 내부 체계가 설계된다면 분석자와 담당

자간의 검토성과 이해성, 공감성 실현에 충분히 가능하다. 또한 이와 같은 방식의 QRA 시스템이 구현된다면 공정 및 주변 환경과 관련한 입력 정보의 변화나 분석 모델의 작은 변화가 있는 경우 비전문가들도 스스로 수정과 자체 평가를 수행함으로써 업무적 측면에서 효율성을 높일 수 있는 부가적 이익을 얻을 수 있다고 판단한다.

## **2) 협력성(분업성) 실현을 위한 구심점 연구와 그를 통한 위험 분석의 속도, 효율성 증가**

신속하고 효율적 분석을 위해 QRA를 분업화된 체계로 전환하는 것에 주안점을 두고 연구를 수행하였다. 이것은 QRA 전문가에게 모든 분석을 의존하게 되는 경우 다양한 분석 요구 시점에서 QRA를 적시에 수행할 수 없다는 현실적인 제약과 QRA 전문가 외 다른 업무 담당자 및 전문가의 지식과 역량을 최대한 활용한다는 측면을 고려한 것이다. 기존 QRA 절차를 살펴볼 때 담당자들로 도움을 얻을 수 있는 영역을 확보하여 분석의 시간을 축소할 수 있는 부분이 있다. 예를 들어, 위험 모델 외에 설비 및 운전 정보, 보수 정보, 지리 정보, 주변 인구자료, 기후 정보 등에 대해서는 비전문가의 도움을 받아 분석을 진행하는 것이 가능하다.

## **3) 정보 축적성, 공유성 기능을 가진 구심점 연구와 그를 통한 지속적, 효율적 QRA 실현**

위험 정보를 축적하고 공유하는 기능을 가지도록 함으로서 위험 분석을 발전시킬 수 있는 체계를 실현화하는 연구를 수행했다. 이것은 기존 연구들에서 위험 정보는 반드시 쉽게 접근되고 공유되어야[80, 81]한다는 주장과 맥락을 같이 하는 것으로서 QRA를 위한 위험 분석 정보도 그러한 측면에서 구성되어야 함을 고려한 것이다. 실질적으로 공정산업은 건설 초기 단계부터 운영 단계까지 각 단계마다 가용할 수 있는 정보는 점차 많

아지고 섬세해져 나간다. 따라서 그러한 정밀성이 점차 높아지는 정보에 맞추어 위험 분석 정보가 누적되고 개선이 될 수 있다면 불필요한 중복 작업을 최대한 제거하여 분석의 효율성을 극대화할 수 있다고 판단한다. 또한 이것은 사람에 의존하는 것이 아니라 체계에 의존토록 함으로서 QRA 비일관성을 최소화한다는 데 의미가 매우 높다고 판단한다.

본 연구에서는 이러한 구심점을 [Accidental Release Hazard Scenarios Point : ARHSP] 이라는 이름으로 명명한다. 위험물질 공정산업에서의 모든 위험은 물질의 누출로부터 시작하는 것이므로 누출이 일어나기까지의 주요한 사고경위와 단위 사건 목록, 결과분석을 위하여 필요한 누출 시나리오 정보를 담은 분석점이다. 이 분석점은 다양한 전문가의 초기적 분석 결과, 지식, 경험, 기존 연구 자료 및 관련 데이터, 관리 자료로부터 만들어지고 검토되고 완성된다는 개념을 Figure 4-2는 설명하고 있다. 또한 이 분석점은 분석 프로그램 측면에서 설비 배치도에 두는 위치 점으로 역할을 수행하게 된다.

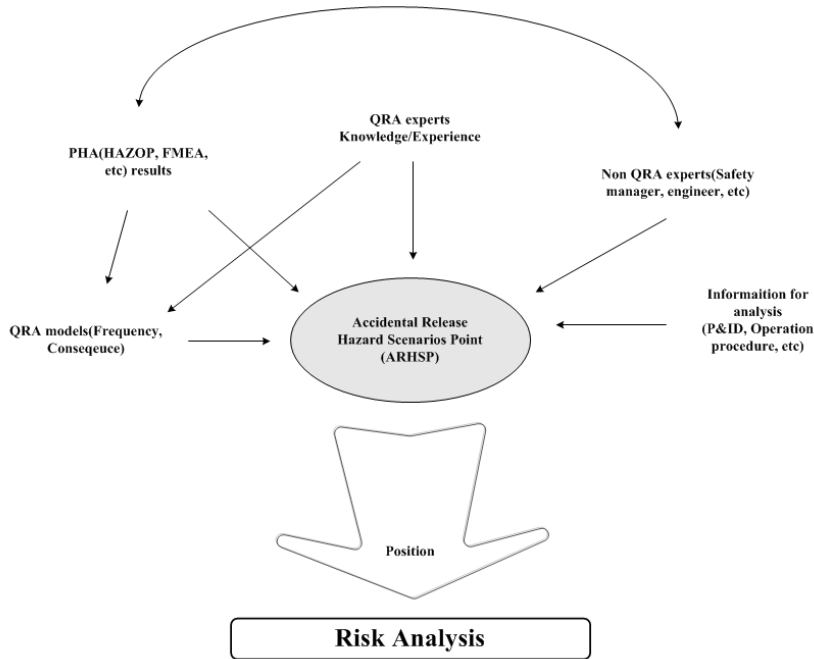


Figure 4-2 구심점(ARHSP) 완성을 통한 분석 개요

이러한 개념을 전제로 Figure 4-3과 같이 ARHSP 라는 구심점을 이용한 QRA 분석 기본 절차를 구상하고 도시하였다. 시스템에 대한 이해와 위험요소 확인 단계에서는 모든 이해관계자들이 참여하고 정량 분석이 될 시나리오 선정과 ARHSP 내부에 위험 모델 작성 및 필요한 요구 정보 설계는 전문가가 작성하며 그것에 대한 검토와 데이터 입력은 비전문가가 수행함으로써 분석 프로그램에 의해 완료되는 간략한 체계를 보여주고 있다. 보는 바와 같이 위험분석 정보 부분을 이해가 쉬운 체계로 구성하고 환경 변화에 따라 모든 이해관계자들이 함께 협력하여 실행하는 패러다임으로의 전환은 기존의 정량 위험 분석 체계와는 다른 발상이다.

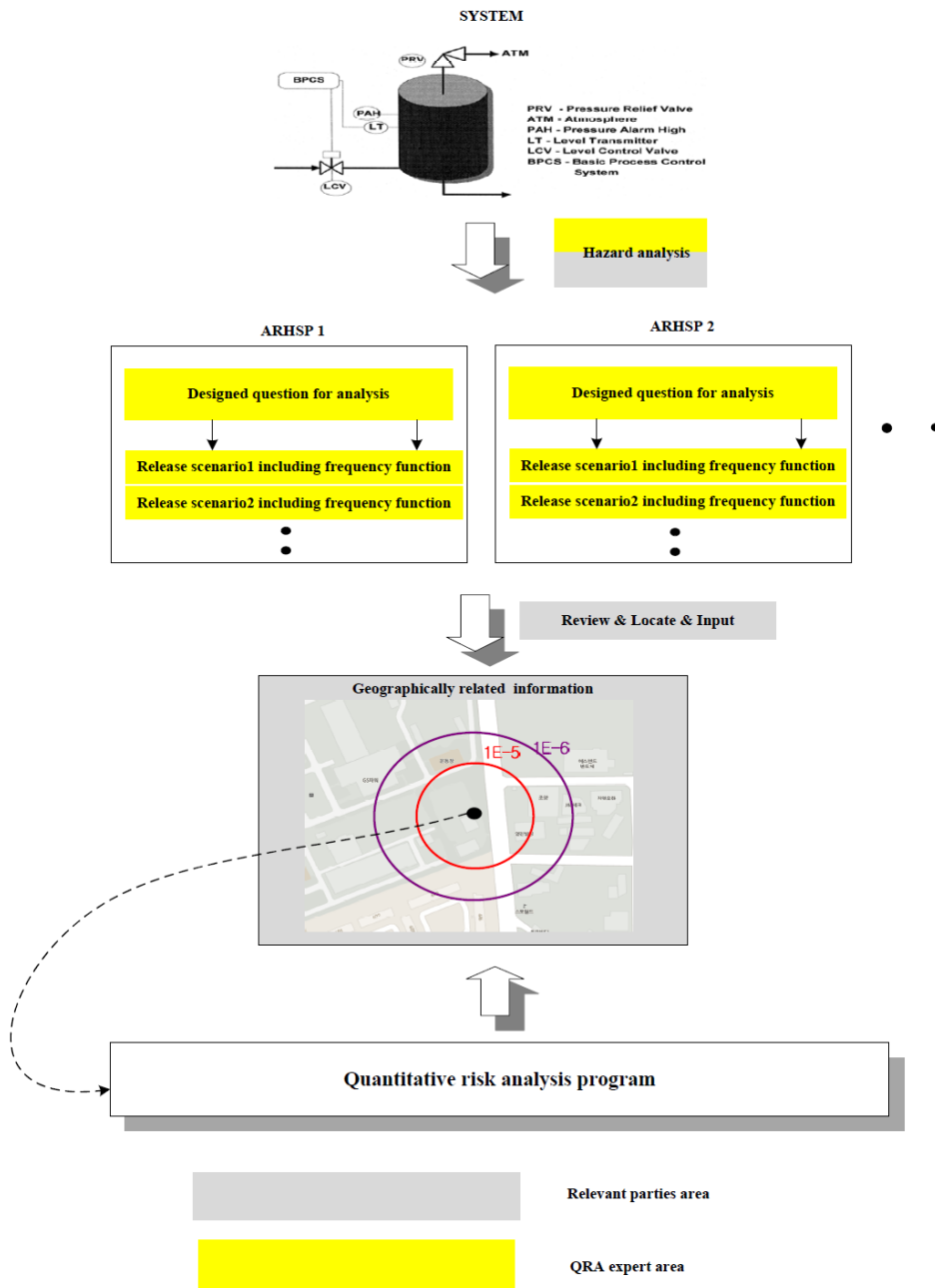


Figure 4-3 ARHSP를 이용한 QRA 분석 기본 체계

## 4.2 ARHSP 제안 기반 논리

효율적 위험 정량화를 위해 주안점을 둔 협력성(분업성), 검토성, 활용 지속성을 얻기 위한 ARHSP 설계에 있어 그 기반 논리는 사고빈도 분석 이론에서 얻었다. QRA는 궁극적으로 결과분석이 될 사고경위와 누출 시나리오 도출이 가장 중요하며 제3자를 이해시키는 부분에 있어서도 가장 잘 정리되어 제시되어야 할 부분이다.

사고빈도 분석 모델은 Figure 2-7에서 보였던 바와 같이 fault tree 와 event tree로 작성되고 사고경위, 즉 minimal cut sets 는 부울 대수를 통해 얻어지며 각 기본 사상의 값은 해당하는 확률이론식을 통해 얻어지게 된다. 여기서 minimal cut set들 중에서 정성적 순위화(포함한 기본사상 숫자가 적은 것부터 나열한 순위화)나 근사 값 적용에 의해 얻은 set 들과 거기에 포함된 기본사상들이 정량 분석에 있어서 가장 중요한 정보이다. 따라서 Figure 4-4에서 보는 바와 같이 그러한 정보를 중심으로 비전문가들과의 상호간에 위험 분석에 관한 이해를 도모해나가고 확률식에서 기본고장률을 제외한 나머지 필요한 입력정보는 관련자들로부터 받아 정량화하는 절차를 담는 것이 ARHSP 설계의 핵심 개념이다. 이러한 논리에 의해 사고빈도 분석은 Figure 4-5와 같은 흐름으로 전개되고 변화한다. 전문가들은 사전 빈도 모델을 통해 중요한 사고 경위를 도출하고 그에 대한 검토와 의견, 정보(예, 보수 시간, 점검 주기 등)는 관련 담당자들로부터 받아 빈도 계산이 최종 완료된다. 만일 공정이나 환경이 변화하여 사고경위가 다르게 되는 경우는 그 중요성이 다시 검토되어 변경되며 관리 정보가 변경되는 경우는 재수정되어 쉽게 재계산된다.



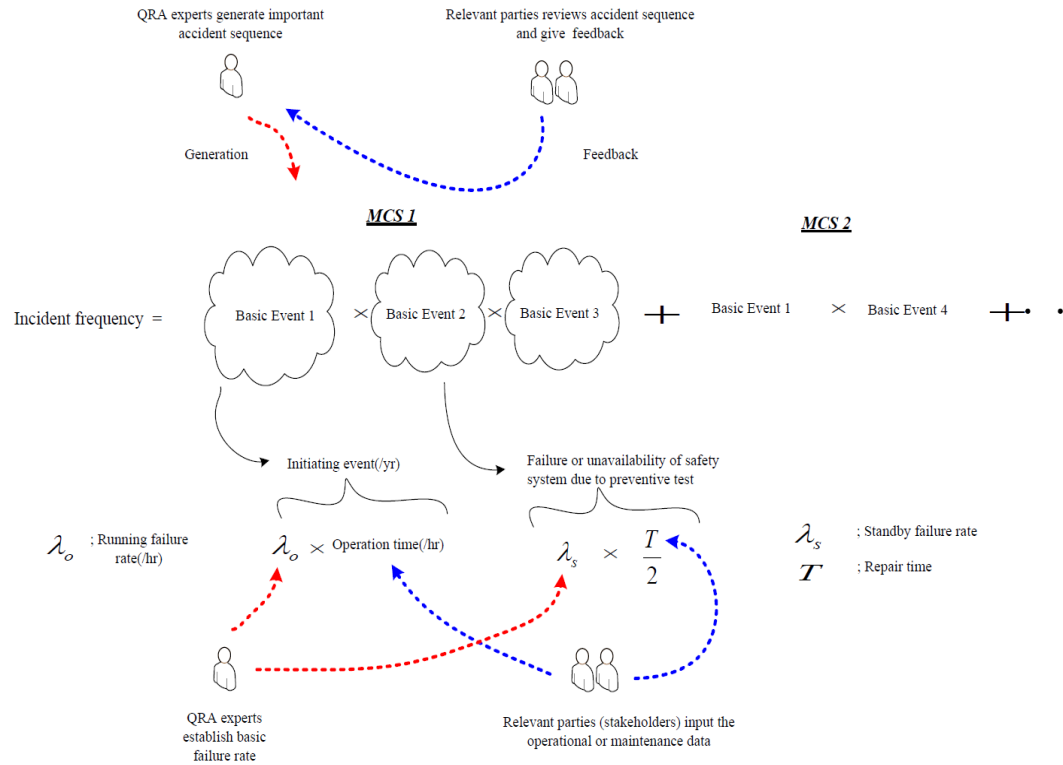


Figure 4-4 사고빈도 분석에 관한 이해관계자 역할과 패러미터 설정 배분에 대한 개요

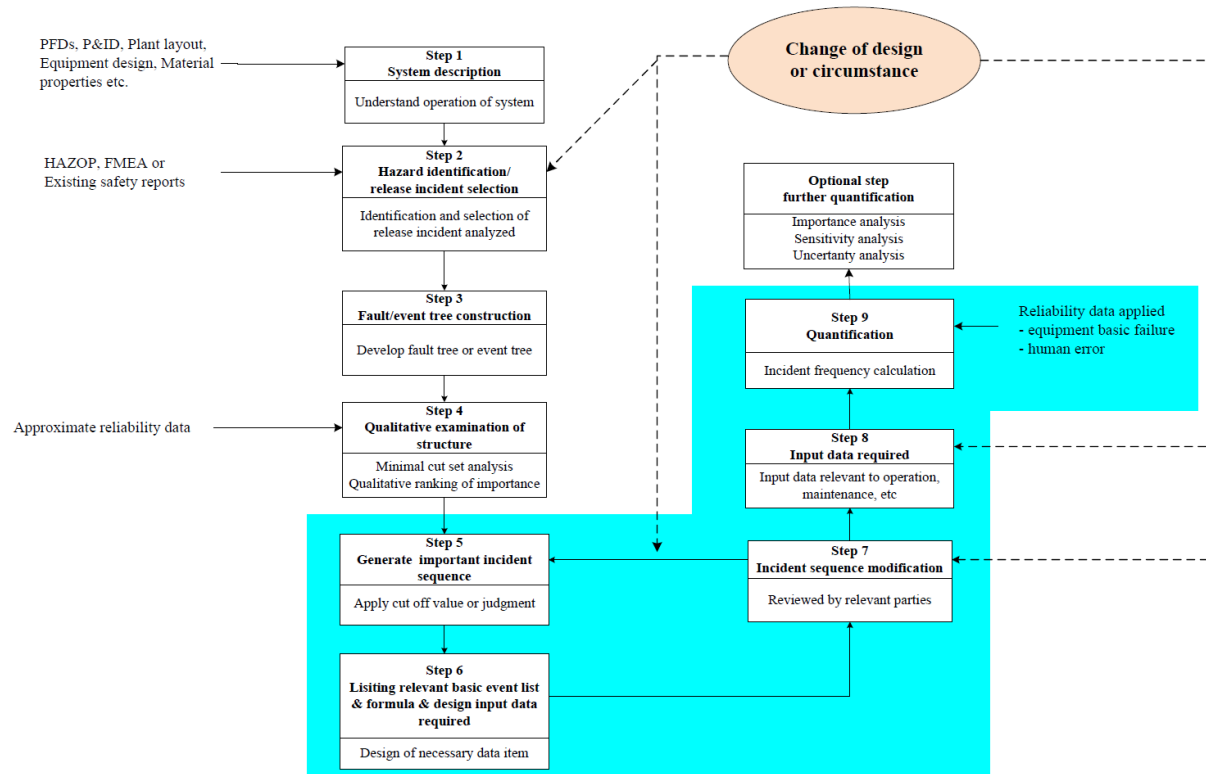


Figure 4-5 사고빈도 분석 흐름의 변경

### 4.3 ARHSP 내부 수식 구성

4.2절에서 제안한 변화된 사고빈도 체계와 기존의 결과분석 이론을 기반으로 효율적 QRA를 실현하기 위한 ARHSP 내부의 기본 구성을 Figure 4-6과 같이 수립했다. 그것은 질의서 부분, 기본 사상(사건) 확률 부분, 사고 경위 및 빈도 수식 부분, 사고결과 분석을 위하여 필요한 누출 시나리오 설정 부분과 그에 해당하는 사고 경위들의 합을 설정하는 최종 사고 시나리오 및 빈도 수식 부분이다. 질의서에 의한 응답들은 기본사상 확률식에 변수로 작용하거나 또는 누출 시나리오 설정시 필요 정보로 대입이 되어 분석에 필요한 정보로 변환된다. 각 사고 경위와 그 빈도는 얻어진 관련 초기 사건빈도에 안전 시스템/설비들 각각의 고장확률과의 곱으로 표현되고 계산된다. 그리고 최종 사고의 빈도는 전문가가 선택한 빈도의 합으로 계산된다.

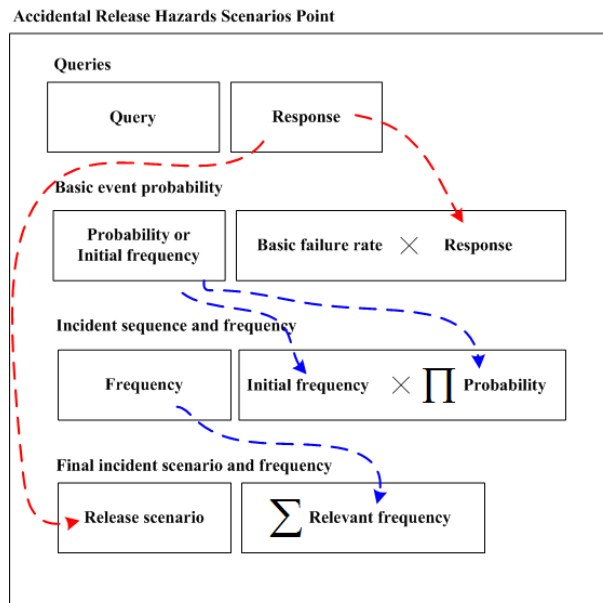


Figure 4-6 ARHSP 내부 항목 구조 및 연관 개요

### 4.3.1 질의들 및 기본 사건 확률 부분

질의영역은 기본사상 확률 계산, 최종 사고빈도 계산 및 사고 누출 시나리오 설정과 관련하여 필요한 데이터 값을 받기위하여 질의와 대응 입력 변수를 지정하는 곳이다. 다시 말해 결국 QRA 분업화를 실현하기 위하여 전문가가 직접 데이터를 구하는 시간을 감소시키고 관련 정보를 많이 접하는 관계자로부터 운전정보, 보수정보 등에 관한 필요 데이터를 요구하는 영역이다.

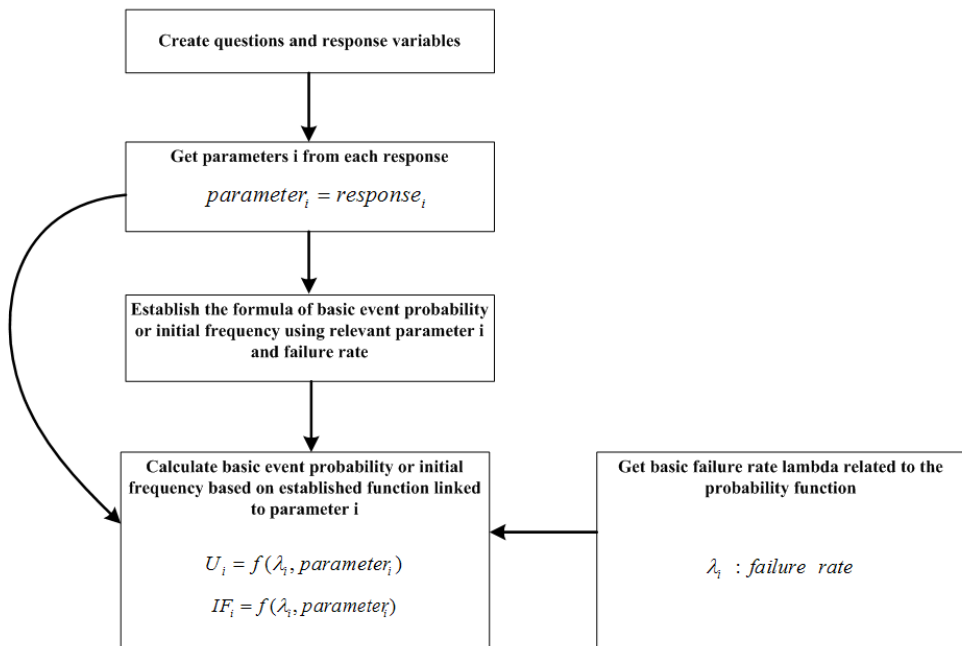


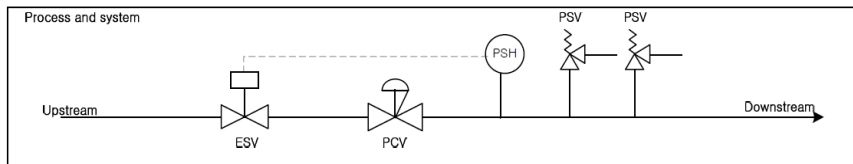
Figure 4-7 ARHSP 내부 기본사상 확률 계산 체계

기본사상 확률영역은 Figure 4-7과 같이 절의영역에서 입력받은 값과 관련 기본 고장률을 이용하여 기본 사상들에 대한 확률/빈도 계산식을 세우고 계산하는 부분이다. 설정해야 할 기본사상은 사고 시나리오 (minimal cut set)에 포함되어 있는 기본 사상들이다. Table 4-1은 이와 관련하여 전문가와 관련담당자에게 기본사상 확률계산에 필요한 입력 정보의 효과적 배분에 관한 도표이다. 구해야할 기본사상들의 유형에 따라 기본고장률은 전문가가 설정하고 설비 운영 및 관리 정책 등에 관한 사항은 안전관리자, 보수원 등이 설정한다.

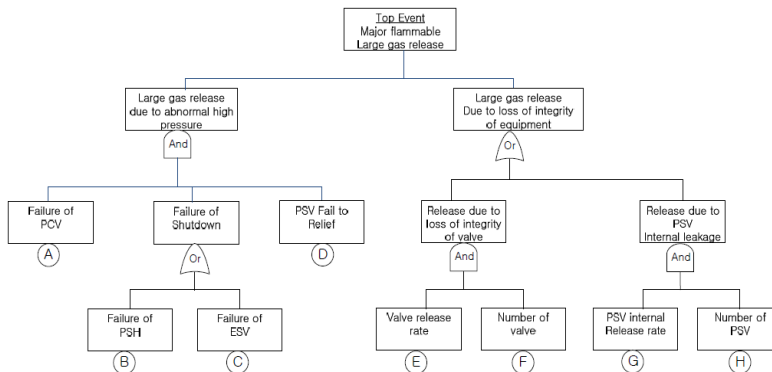
Table 4-1 고장확률, 불가용도 계산을 위한 입력 변수 배분

Unavailability, failure probability	분석 전문가 설정	담당자 설정
Unavailability		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non continuously monitored, periodically tested standby components</li> </ul> <p>1) 점검 주기 내 고장으로 인한 불가용도</p> $U \simeq \frac{1}{2} \lambda T$ <p>2) 고장 감지 후 수리로 인한 불가용도</p> $U \simeq \lambda T_R$ <p>3) 정기적 보수를 하는 경우 불가용도</p> $U = f_m T_m$	$\lambda$ : 대기고장률	$T$ : 테스트 주기
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non continuously monitored, untested standby components</li> </ul> $U = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda T_p}}{\lambda T_p}$	$\lambda$ : 대기고장률	$T_R$ : 수리 소요 시간
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuously monitored, non repairable components)</li> </ul> $U \simeq \lambda T_M$	$\lambda$ : 운전고장률	$T_m$ : 수리 소요 시간 $f_m$ : 정기적 수리 빈도
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuously monitored, repairable components</li> </ul> $U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{\lambda T_R}{1 + \lambda T_R}$	$\lambda$ : 운전고장률	$T_p$ : 추정 점검 기간 (fault exposure time) $T_M$ : 작동 요구 시간 (mission time) $T_R$ : 평균 수리 시간
Probability		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demand failure probability</li> </ul> $\lambda$	$\lambda$ : 요구시 고장률	
Frequency		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Failure frequency</li> </ul> $\lambda$	$\lambda$ : 고장 빈도	

Figure 4-8은 제시한 논리의 이해를 위해 고압가스 정압설비들에서 설비고장에 의해 후단 압력 상승 사건과 이에 대한 안전시스템의 연속적 고장으로 인하여 발생할 수 있는 누출 사고의 빈도를 계산하기 위한 질의 영역과 기본사건 확률 부분을 작성한 사례이다. 기본 확률식에서 보는 바와 같이 PCV 고장빈도(압력상승 고장모드)는 해당 고장모드의 고장률 값에 연간 운전 시간의 곱이며 초기사건이다. 기본고장률은 전문가가 설정하고 운전시간은 질의를 통해 답을 얻어서 계산이 된다. ESV(Emergency Shutdown Valve)와 PSH(Pressure Switch High)는 고장유형은 점검주기 내 고장으로 인한 불가용도 유형에 해당하며 따라서 전문가가 설정한 각 고장률 값에 관련자가 입력한 점검주기(Proof Test Interval)/2 값을 곱하여 얻는다.



### Hazard identification & Release frequency modeling



### Extracted minimal cut sets

Event sequence for incident frequency  
 1. A x B x D  
 2. A x C x D  
 3. E x F  
 4. G x H

### Setting basic probability equation

V1(A) = (PCV running failure rate) x (X1 : Running time)  
 V2(B) = (ESV failure rate) x 1/2 x (X2 : Proof test interval)  
 V3(C) = (PSH failure rate) x 1/2 x (X3 : Proof test interval)  
 V4(D) = PSV demand failure rate  
 V5(E) = (Valve leakage rate)  
 V6(G) = (PSV internal leakage rate)

### ARHSP (Queries and Basic Probability)

Queries									
Num	Question List			Response(X)	Comments				
1	PCV Running time?				hour				
2	ESV Proof test interval?				hour				
3	PSH Proof test interval?				hour				
4	Valve number?				ea				
5	PSV number?				ea				

Basic event probability/initial frequency									
V1	=	PCV running failure rate	x	X1					
V2	=	ESV failure rate	x	1/2	x	X2			
V3	=	PSH failure rate	x	1/2	x	X3			
V4	=	PSV demand failure rate							
V5	=	Valve leakage rate	-	-	-	-			
V6	=	PSV leakage rate	-	-	-	-			

Figure 4-8 ARHSP 내부 질의 작성과 기본사건 확률식 수립 예제



### 4.3.2 사고 경위 및 빈도 계산 부분

ARHSP는 분석시 지리적 위치점으로 활용되므로 그 위치에서 발생할 수 있는 여러 누출 경위들을 포함할 수 있고 각 누출 경위는 minimal cut set 이다. 각 minimal cut set 에 포함된 기본 사상들의 나열과 그 곱으로 이루어진 함수식은 이해관계자들이 시나리오와 위험도를 이해하는데 매우 중요하며 Figure 4-9 는 그 관계식을 표현하고 있다. 사고빈도  $F_i$  은 초기사건(빈도)에 시스템 실패 또는 불가용도 값의 곱의 함수이다.

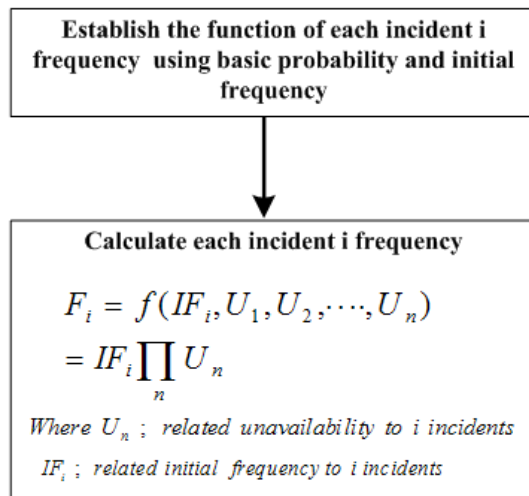


Figure 4-9 ARHSP 내부 사고 경위 및 빈도 계산 체계

### 4.3.3 최종 사고 시나리오 및 빈도 부분

사고결과 및 영향 평가의 시작점인 누출원 분석에 필요한 정보를 설정하고 사고빈도 영역에서 해당하는 누출 사고를 설정하는 영역이다. 여기는 그룹핑의 기능을 수행하는 영역이 될 수 있다. 예를 들어 동일한 누출 직경과 동일한 물질 상태이지만 그 저장량이 다른 시나리오가 있다면 실질적으로는 그에 대응하는 시나리오를 다시 지정해주어야 하지만 보수적으로 저장량이 많은 시나리오에 사고 빈도를 합산하여 해석할 수 있을 것이다. 다만 여기서는 부울 대수의 Absorption 규칙에 위배하여 중복 계산할 가능성이 있으므로 이에 대한 논리가 고려된다.

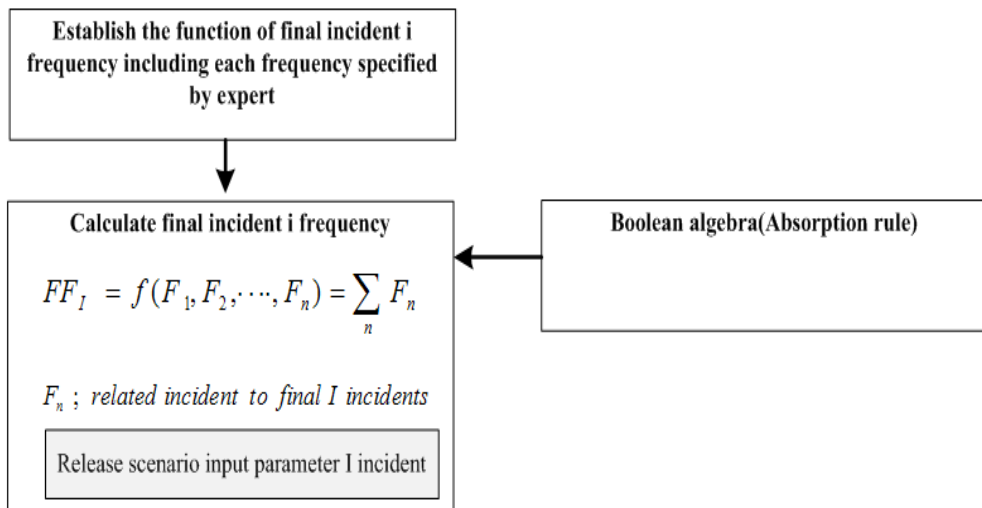


Figure 4-10 ARHSP 내부 최종 사고빈도 계산 체계

## 4.4 사고결과 및 위험도 분석 흐름도

ARHSP를 기반으로 하여 위험 정량화를 하기 위해서는 사고결과/영향 평가 모델과 연계되어야 한다. 누출 시나리오 설정 부분에서 결과분석을 위해 필요한 정보가 설정되었으므로 Figure 4-11과 같은 연계 구조로 위험 분석 프로그램을 이용하여 해석하게 된다.

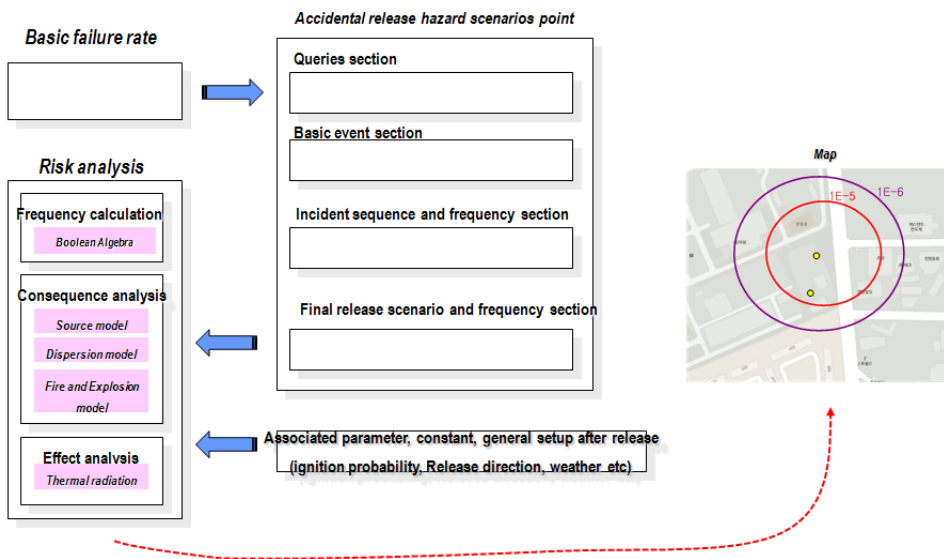


Figure 4-11 ARHSP 연계 위험 분석 체계

ARHSP는 지리적으로 위치할 수 있는 위험 분석점이다. 위치가 선정되고 데이터가 입력되면 각 ARHSP 포함되어 있는 누출 시나리오별로 사고결과/영향 분석이 적합한 모델에 따라 이루어지고 정량화를 위한 빈도는 Figure 4-12와 같이 주어진 절차에 따라 계산이 수행된다.

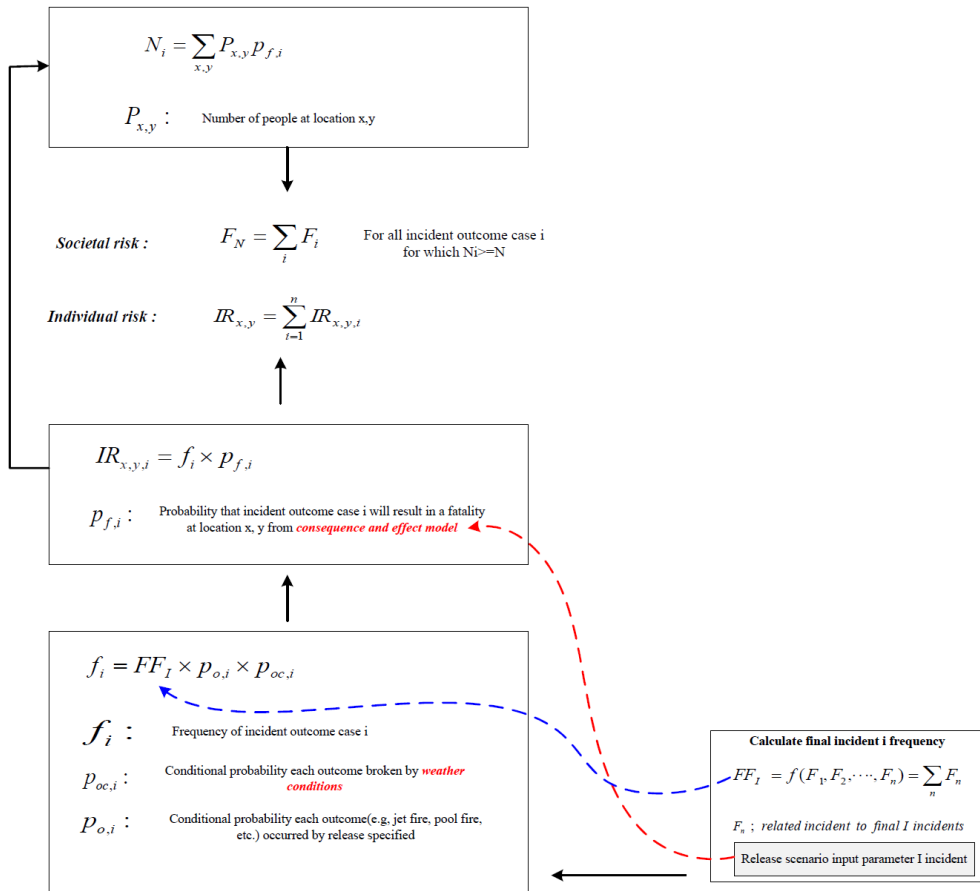


Figure 4-12 ARHSP 연계 위험도 계산 수식 흐름도

Figure 4-13은 ARHSP 기반 전체 위험도를 분석하는 흐름도이다. 먼저 지도상에 삽입된 모든 ARHSP를 개별로 하나씩 분석해 나간다. 선택된 ARHSP에 포함된 하나의 누출 시나리오의 빈도 계산이 이루어진 후 누출원 모델 분석이 이루어지고 위치별(x, y좌표별)확산 해석이 이루어진다. 여기서 발생할 수 있는 다양한 사고결과의 경우는 일반 패러미터 설정에 따라 그 분율이 결정이 된다. 확산 해석 후 가연성 물질인 경우는 화재 및 폭발 분석이 이루어진다. 위치별 복사열, 압력 프로파일이 얻어지며 독성 물질인 경우는 확산 해석 후 얻어진 위치별(x, y 좌표별) 그 농도가 결과 프로파일이다. 이러한 복사열, 압력, 농도 프로파일이 얻어진 후 각각의 프로파일에서 다시 영향 모델과 연계하여 위치별 사망률이 얻어진다. 모든 사고결과 경우에 대한 분율이 얻어지고 그에 상응한 위치별 사망률이 얻어진 것을 곱하여 지도의 해당 위치에 사망률을 누적한다. 그리고 각 사고결과 경우별로 미치는 영역에 걸쳐있는 인구 밀도를 기준으로 기대 사망자수를 계산한다.

하나의 누출 시나리오가 끝나면 ARHSP 내부에 있는 다른 최종 사고 시나리오에 대하여 동일한 과정을 반복하며 모든 시나리오에 대한 분석이 끝나면 다른 ARHSP에 있는 시나리오를 분석한다.

모든 분석이 마무리되고 각 위치별(좌표별) 누적된 개인적 위험도를 산출하고 등고선 알고리즘을 이용하여 contour를 구한다.

각각의 사고결과 경우별 얻은 기대 사망자수 테이블에서 1부터 사망자수 대비 그 사고결과 경우의 빈도를 정렬한다. 정렬이 된 후  $F(N)$ 은  $N$  이상의 사망자수를 낸 모든 사고결과 경우의 빈도 합이며 이를 이용해 F-N 곡선을 얻는다.

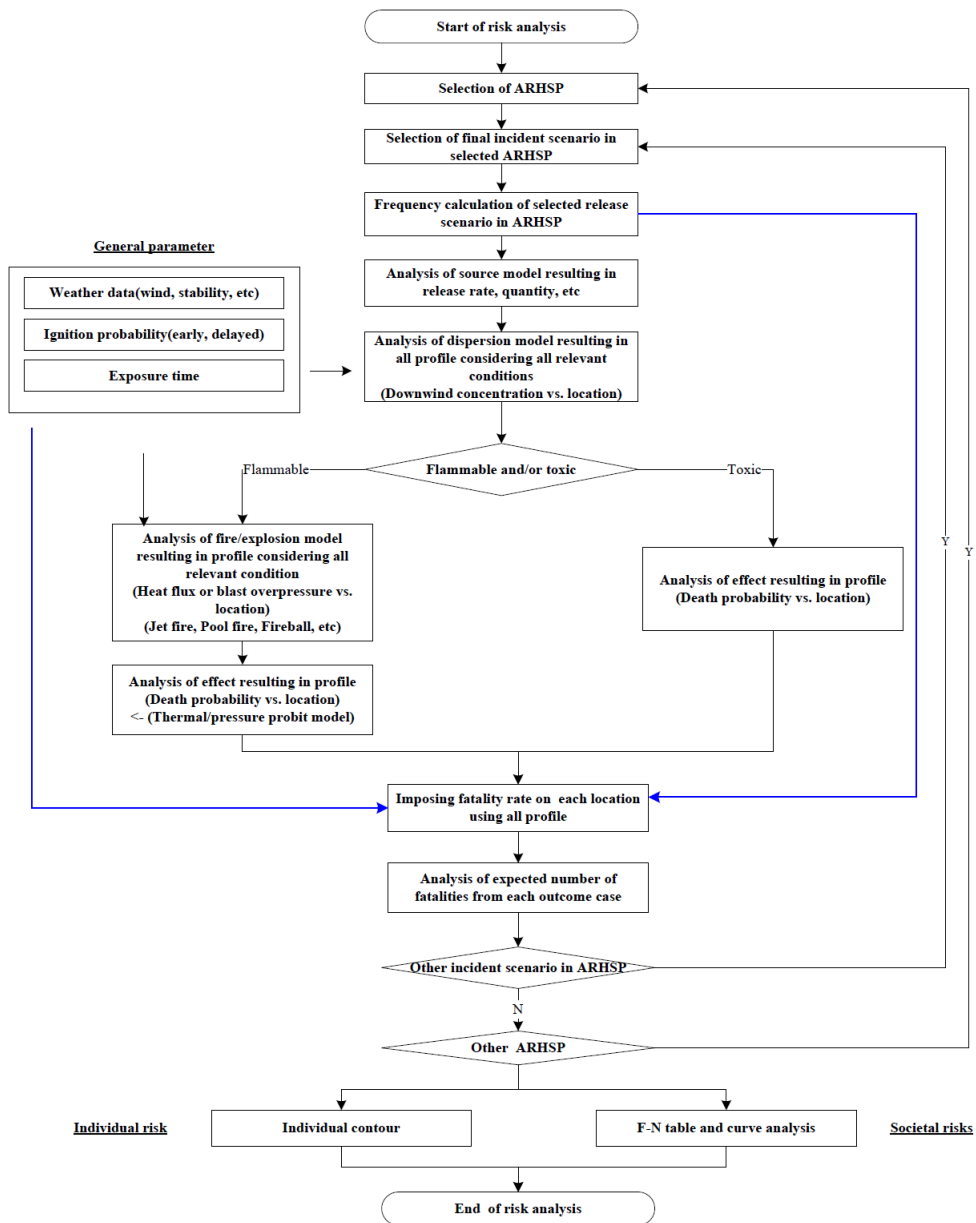


Figure 4-13 ARHSP를 이용한 위험 정량화 전체 흐름도

## 4.5 정량적 위험관리 프로세스 모델

위험관리란 모든 이해관계자가 위험의 확인, 분석, 위험의 처리를 이해하고 검토하며 그 과정을 반복적으로 시행하는 것이다. 하지만 정량적 위험 분석은 오랜 분석 시간과 위험 모델이 이해하기 어려워 그러한 과정을 수행하기 어렵다. 그러나 제안한 ARHSP는 분업과 검토를 가능케 하는 구심점으로서 위험관리 프로세스에 포용이 가능하다고 판단한다. Figure 4-14은 본 연구에서 제시하는 정량적 위험관리 프로세스 모델이다. ARHSP를 실질적으로 활용키 위해서는 시스템화 되어야 할 필요가 있으며 제시된 모델은 그 전제에서 개발된 것이다

굵은 실선은 위험성 평가의 순환 관계를 말하고 있다. 일점쇄선은 QRA 전문가의 주 역할에 대하여 설명하고 있으며 점선은 이해관련자들의 역할을 표현하고 있다. 위험요소의 확인단계에서 QRA 전문가가 정량 위험 분석을 할 사고 시나리오 선정과 그에 대한 ARHSP를 작성한다. 이 때 담당자들은 작성된 ARHSP를 기반으로 사고 시나리오를 이해하고 검토하며 의견을 교환한다. 그리고 필요시 수정하게 된다. 그리고 완료된 ARHSP는 인벤토리에 저장된다. 분석단계에서는 주로 담당자가 ARHSP 인벤토리에서 해당되는 것을 선택하고 지도에 위치하며 필요한 정보를 입력한다. 입력이 완료되면 위험 분석 프로그램이 가동되어 결과가 산출되며 위험 기준과 비교한다. 여기서 위험이 높은 경우는 위험 감소를 위한 대책들이 수립되고 적용된다.

ARHSP 인벤토리는 크게 3가지 종류가 있다. 첫째 신규로 생성된 일반/표준 ARHSP가 저장되는 인벤토리이며 둘째는 특정(specific) ARHSP 인벤토리이고 셋째는 내장된(embedded) ARHSP 인벤토리이다. 특정 인벤토리를 두는 이유는 사용중인 ARHSP 가운데 지속적 개선이 이루어져 다

른 프로젝트에서 일반 ARHSP 보다 활용 가치가 더 높은 경우 등록하여 사용하기 위한 것이다. 이 경우에 있어서는 일반 담당자들이 사용하는 경우가 많게 되고 따라서 전문가는 이에 대한 검토와 수정 역할을 하게 된다. embedded ARHSP 는 프로젝트에 삽입되어 있는 ARHSP를 보여주는 가상의 인벤토리로서 실무적 편리성을 추구코자 하는 개념에서 설정한 것이다.

결국 제시한 모델은 QRA 수행 역무를 전문가에게만 맡기는 것이 아니라 현장 인력의 위험성 평가 수행 능력 향상시키고 인력을 효율적으로 배분하는 새로운 패러다임이다. 즉 이것은 기존의 세계적 안전관리 기술 표준 및 논문 등에서 제시된바가 없는 실용적 정량적 위험관리 프로세스로서 이해관계자들을 참여시키고 지속적으로 수행해나가는 새로운 체계이다.



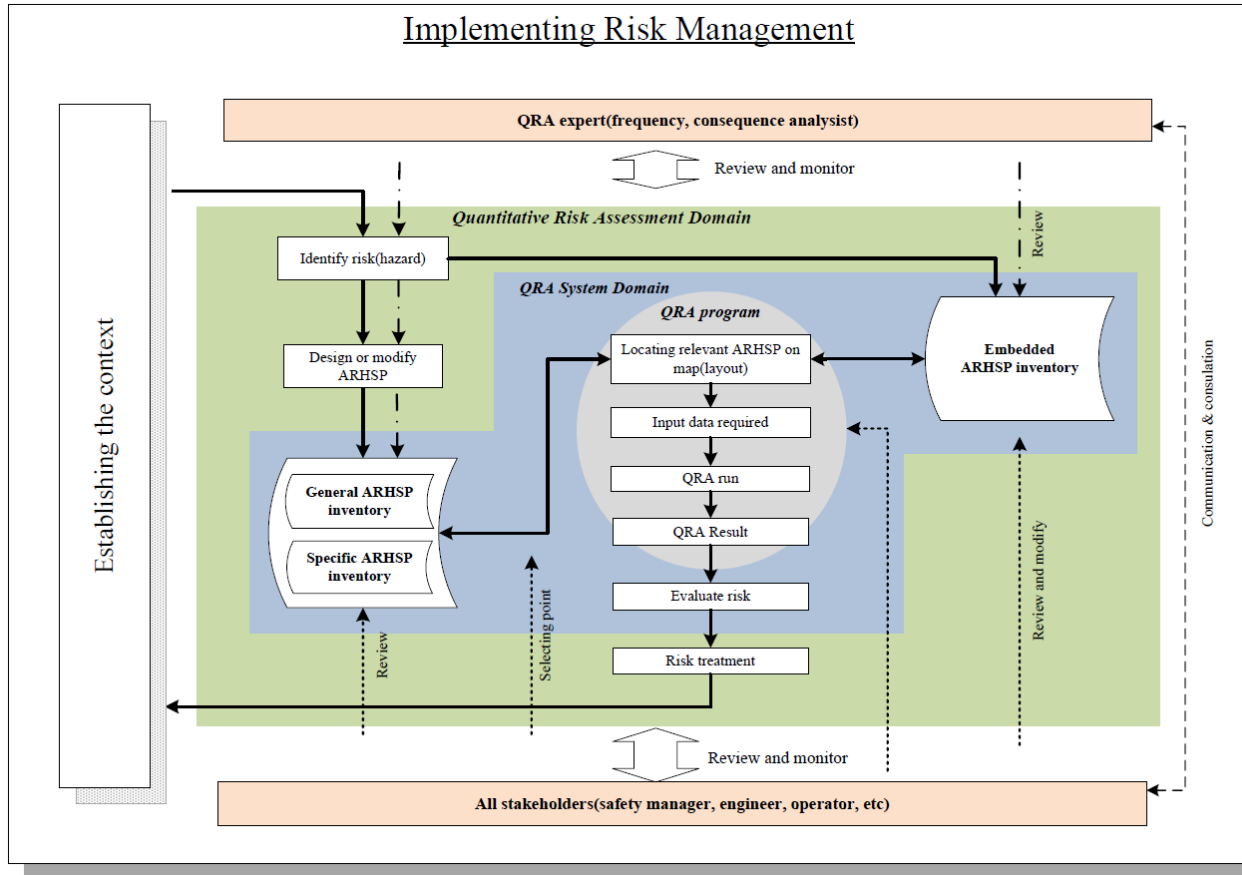


Figure 4-14 제안하는 정량적 위험관리 프로세스 모델

## 4.6 ARHSP 기반 연속적 정량 위험 분석 실현

위험성 평가를 위해 가용할 정보의 양과 질은 위험성 평가 수행 당시의 공정 단계 수준에 의존한다. 따라서 초기의 위험성 평가 모델은 정보의 증가에 따라 점차 발전할 수 있는데 단속적 평가 형태로는 효율적인 평가가 이루어질 수 없다.

하지만 ARHSP는 위험 지식을 축적하고 지속적 평가의 역할을 쉽게 할 수 있는 데 그것은 설계단계에서부터 운영단계에까지 증가되는 정보의 방향을 고려해볼 때 가능하다. 일반적으로 초기 설계단계의 위험성 평가 모델 수립의 주방향은 결과분석 중심이며 설계 및 운전 정보가 많아질수록 사고빈도와 관련한 모델 수립에 집중하게 된다.

Figure 4-14와 같이 초기설계 단계의 주 관심사는 플랜트 위치 선정과 설비간의 이격거리를 결정하는 것이다. 이 단계에서 활용할 수 있는 정보는 제한적이며 물질, 지리 정보, 인구 자료 정도로서 결과분석을 통해 부지 선정, 비상 절차 수립을 할 수 있다. 하지만 ARHSP 내부에 결과분석을 위한 모델과 입력 정보가 정립이 되면 상세설계 단계에서는 그대로 활용할 수 있다. 즉 결과 분석 모델은 두고 설계와 물질, 저장량, 운전 조건 등을 데이터를 활용하여 사고빈도와 신뢰도 데이터를 활용하여 상세 QRA를 수행할 수 있는 데 이것이 연속적 평가 체계인 것이다. 또한 운영 단계에 접어들어 법률에 의해 주기적으로 QRA를 수행해야 하는 경우나 주변 환경의 변화/설비의 변화로 인해 QRA가 필요하게 되는 경우 기존의 사고경위(빈도) 및 누출 시나리오 입력 자료를 그대로 활용하거나 몇 가지 정보를 변경하여 쉽게 분석할 수 있다. 뿐만 아니라 운전과 정비 정책에 관한 사항을 반영하여 분석한다면 QRA를 위험정보 기반 활용 기술로서 그 효용성을 극대화할 수 있다. 여기에서의 ARHSP 입력 정보의 변

경은 보수 및 운전 정책에 관한 것으로서 위험도 변화를 통해 허용 수준 아래서 설비 관리에 관한 최적화된 의사 결정을 수행할 수 있다.

이처럼 ARHSP의 활용은 기존의 단속적인 QRA 체계를 보다 연속적이고 활용 분야를 확장시킬 수 있는 매우 실용적이고 실질적인 QRA 체계로 변환한다.

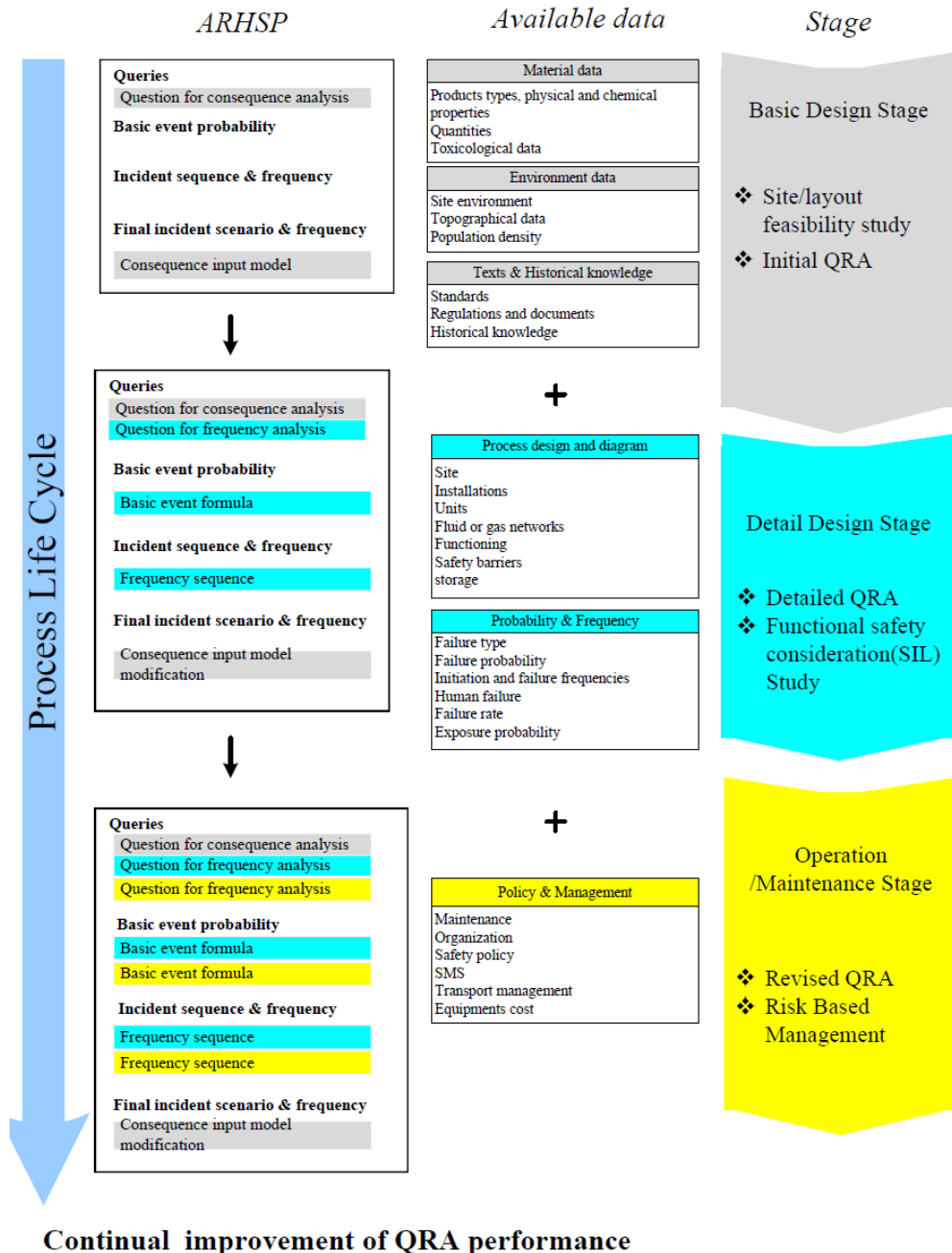


Figure 4-15 연속적 QRA 성능 발전

## 5. ARHSP 기반 QRA 시스템 플랫폼 및 분석 절차

QRA에서는 다양한 입력 데이터가 필요하며 위험도를 계산하기 위해서는 여러 함수식을 좌표들을 기준으로 수 만번 반복 계산하고 plot을 해야 하기 때문에 실질적으로 수작업으로는 할 수 없으며 컴퓨터 기반의 해석이 반드시 필요하다. 따라서 5장에서는 4장에서 제안한 체계를 실질적으로 구현키 위한 구체적 컴퓨터 기반의 플랫폼 설계안과 그에 기반한 위험 분석 절차를 제시함으로써 공정산업에서 QRA 시스템 개발시 명확한 참고가 되고자 한다.

### 5.1 QRA 시스템 플랫폼 구조

플랫폼의 구조(구성)의 핵심적 기반은 Figure 4-4에서 제안한 정량적 위험관리 프로세스 모델과 QRA 활동(activity)이다. 이 플랫폼은 통상적 QRA 프로그램과는 차별화된 구조로서 기존 체계에서는 다루지 않는 사고경위 정보와 기본사상들의 확률 정보를 ARHSP를 통해 QRA 검토성과 분업화를 실현한다는 점이다. 시스템 측면에서 표현하는 QRA 시스템 기본 구조는 Figure 5-1과 같으며 ARHSP 인벤토리(데이터베이스)는 2개의 종류로 구성한다. 하나는 프로젝트(연구대상)와 관련하여 신규로 생성되거나 또는 발전되어 등록된 표준 ARHSP에 관한 관리 인벤토리이며 또 다른 하나는 현재 분석중인 프로젝트에 내장된 ARHSP 인벤토리이다. 이와 같은 인벤토리를 묶음으로서 위험 분석 모델을 관리하고 개선해나갈 뿐만 아니라 기존의 QRA 행태에서 자주 발생하는 시행착오와 그로 인한 관리적(시간적) 손실을 최소화한다. 또한 공정 조건과 현실적 사항을 보다 세밀하게 반영된 특징으로 인하여 향후 유사한 공정에 대하여 QRA 수행시

그 효과와 효율을 보다 크게 하는 명확한 이득을 가지게 된다.

이러한 기본구조에 입각하여 분석에 필요한 세부 모듈을 가진 시스템의 구조를 Figure 5-2와 같이 구성하였다. 총 5개의 하위 모듈로 구성하며 Base 모듈, 일반 ARHSP 관리 모듈 및 특정 ARHSP 관리 모듈, QRA 분석을 위한 정보 입력 모듈, 위험분석 프로그램 모듈이 있다. 다음 각 모듈에 대한 기능에 대한 설명이다.

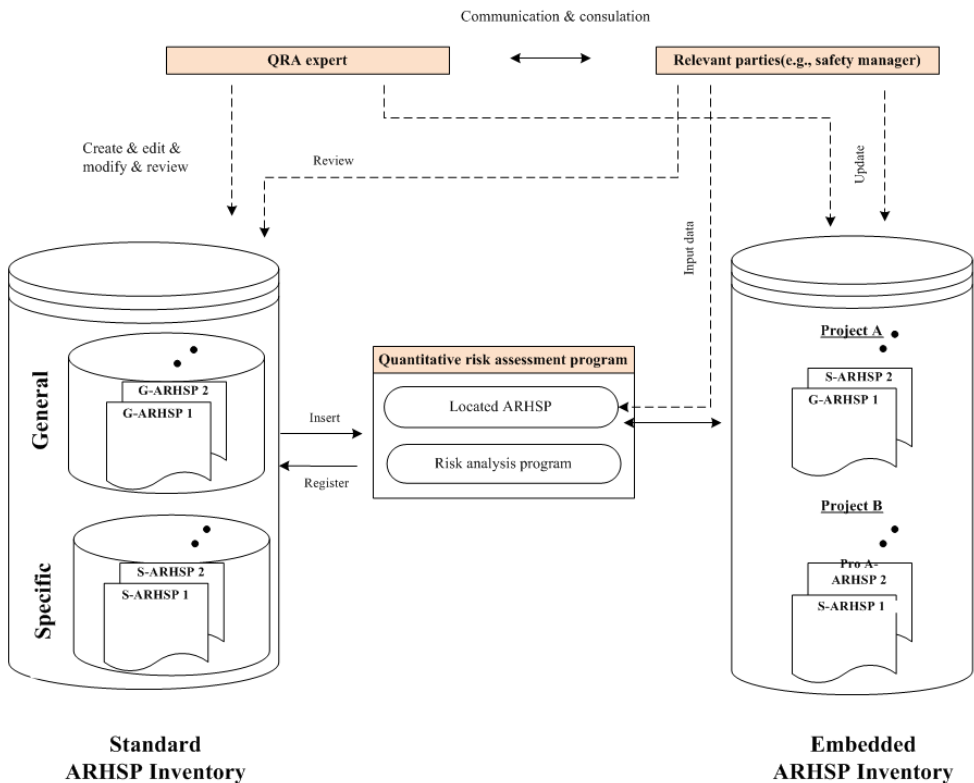


Figure 5-1 제안하는 QRA 시스템 플랫폼 기본 구조

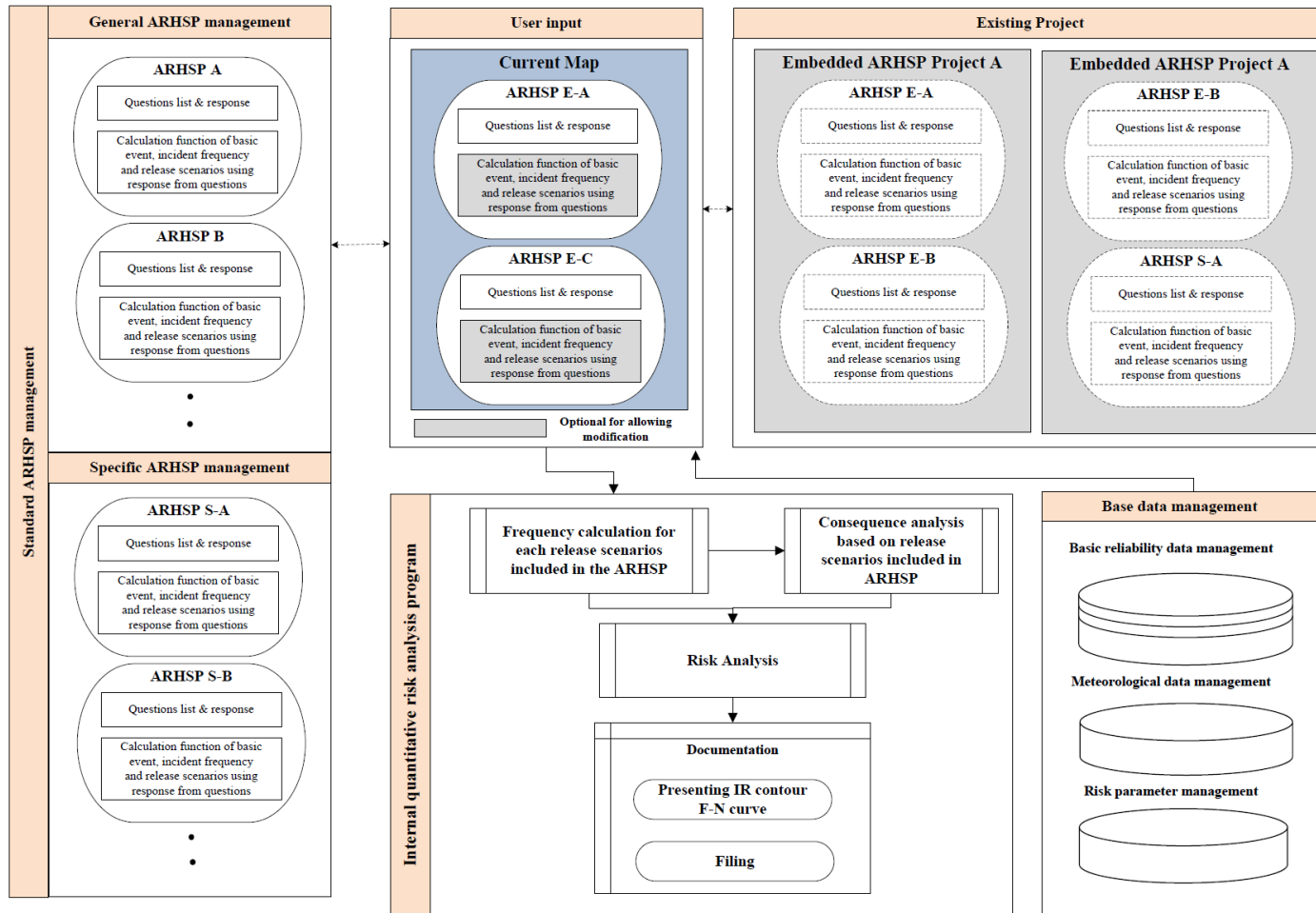


Figure 5-2 QRA 시스템 내부 모듈 상세 구성도

- **Base data 모듈**

이 모듈은 사고빈도 분석과 사고결과 분석에 있어 필요한 기본데이터를 제공하는 모듈이다. 사고빈도 분석을 위해 필요한 기본 고장률과 인적오류 확률 데이터를 저장하고 관리함으로서 기존에 누출 사고빈도를 얻기 위해 별도의 정량화 프로그램을 사용했던 것과는 다르게 통합 관리하는 체계로 변환한다. 사고결과 분석에 관한 데이터와 관련해서는 기존의 체계와 동일하게 물질 자료와 누출원 모델 및 화재, 폭발 모델에 필요한 पै러미터를 설정해놓는 모듈이다. 그리고 사고결과에 영향을 주는 점화 확률 및 기상 데이터 및 누출 방향 분률 데이터 등을 설정하는 모듈이다.

- **일반(general) ARHSP 관리 모듈**

새로운 플랜트, 공정에 대한 QRA를 위해 전문가가 사전 분석을 통해 ARHSP 작성하고 관리하는 모듈이다. 이 모듈을 통해 이해관계자(엔지니어, 설비담당자 등)들은 기존 시스템에서는 할 수 없었던 QRA 시나리오 정보(누출 경위, 누출 시나리오)에 대한 검토와 전문가와의 의견 교환, 공유, 수정이 가능하다. 이것은 궁극적으로 분석 모델을 보다 세밀하게 수립되게 할 뿐만 아니라 모든 관계자들의 참여를 유도하여 QRA 결과에 대한 공감과 합의를 이루는 데 큰 효과를 발휘하게 된다. ARHSP에 대한 자세한 세부 구성은 다음 5.2절에서 상세히 설명하였다.

- **특정(specific) ARHSP 관리 모듈**

QRA 수행시 플랜트 배치도 좌표에 삽입되고 입력된 ARHSP들중에서 분석자들이 재등록하여 관리하는 모듈이다. 이 모듈은 특정한 조건이나 현장의 여건이 반영되어 개선되고 발전해나간 ARHSP를 독립적으로 보존하여 QRA에 활용코자 하는 것이다. 반면에 일반 ARHSP 관리 모듈에서 생성된 것은 변형을 최소화하여 보존한다. 따라서 유사한 프로젝트를 수행하게 되는 경우 활용도 측면에서 비교되며 가치가 높은 것이 사용되어 보다 QRA를 효과적으로 수행하는 데 기여한다.



특정 ARHSP를 활용하는 것과 프로젝트에 이미 삽입된 ARHSP를 사용하는 것과의 차이점은 특정 ARHSP는 전문가에 의해 검토되어 보다 정제된 것이라는 것이다. 사용중인 ARHSP를 그대로 가져다 쓰는 것은 주로 동일한 프로젝트에서 사용할 때 적합할 것이며 이것은 효율적 업무 진행을 고려한 것이다.

- **분석 정보 입력 모듈**

이것은 공장 배치도, 인구 밀도, 거리 척도와 같은 지리 정보를 설정하고 ARHSP 관리 모듈에서 분석자가 선택하여 지도 좌표에 위치한 후 각 ARHSP 내부 질의에 대한 응답을 하는 모듈이다. 이것은 기존 시스템들이 담보하고 있는 사고결과 분석 위주 체계에서 사고빈도 분석을 통합하는 체계로 한 단계 발전한 것이다. 여기서 선택적 기능을 둘 수 있는 데 그것은 삽입된 ARHSP 인 경우에 있어서 내부 질의에 대한 응답만을 가능토록 하여 중요 함수식들에 대한 설정 오류를 방지하고 입력자들에게 복잡성을 낮추는 QRA가 가능하다.

- **Risk Analysis program 모듈**

지도에 삽입한 ARHSP의 위치 정보와 ARHSP 에 저장된 최종 사고 시나리오 및 빈도를 가지고 위험도 분석을 반복적으로 수행하면서 정량적 위험도를 계산하는 모듈이다. 이에 대한 자세한 분석 로직은 4장에서 설명하였다.

## **5.2 ARHSP 시스템적 세부 구조**

ARHSP 내부 상세 구조를 4장에서 제시한 사고빈도 분석 절차를 반영하고 사용 편리성과 이해성을 증진하기 위하여 Figure 5-3과 같이 세부적인 항목 행을 설계하였다.

질의 부분은 질의문과 응답 값을 받는 행으로 구성하고 비교 행에는 입

력해야할 값의 단위나 응답 유형을 명시토록 한다.

기본사상 부분에서는 사고경위 부분에서 참고할 이름 행과 그에 대한 설명과 값에 대한 항목을 둔다. 함수식 설정부분에서는 먼저 기본 고장률 행이 위치하도록 하고 그 값을 이용하여 설정하는 확률 함수식 행을 둔다. 여기서 분석자는 질의에 대한 응답(변수)을 이용하여 설정할 수 있다.

사고 경위 부분에서의 항목 설정은 매우 중요한 의미를 갖는다. 먼저 사고 경위 이름과 관련된 누출 시나리오명, 값을 표시하는 행을 둔다. 여기서 최종 누출 시나리오 부분에서 사고 경위가 지정된 경우 피드백을 받아 누출 시나리오를 표시해주는 행을 둠으로서 설정한 사고 경위가 어떤 누출 시나리오와 연계되는 지를 직관적으로 이해하는 데 도움을 준다. 기본사상 나열과 관련한 항목 행 순서는 일반적으로 이해하기 쉬운 순서인 초기 사건부터 방호층 (protection layer) 순으로 구성한다. 이를 통해 관련자들은 전문가가 설정한 누출사고 경위에 대하여 명확히 이해하며 이에 대한 타당성을 검토하고 빈도분석 모델 전문가와 협의할 수는 있다. 이것은 기존의 정량적 평가 시스템 또는 체계에서는 제시하지 못했던 분석 준비 단계에서의 빈도 모델에 대한 검증능을 가능케 하는 실행 체계로서 잘못된 사고 경위 수립으로 인한 불확실성을 낮추는 데 역할을 한다.

최종 사고 시나리오 설정 부분에서는 먼저 누출원 분석과 관련한 필요 데이터를 받을 수 있는 항목 행들로 구성한다. 필수적으로 물질, 저장량, 압력, 온도, 누출의 방향이 되고 필요에 따라 dike 유무, 실내 공간의 유무 및 부피 등 사고결과에 영향을 줄 수 있는 항목 행들로 구성토록 한다. 그리고 마지막으로 이 누출 사고 시나리오에 연관되는 사고 경위들을 나열하여 최종 사고빈도를 산출하도록 한다. 여기서 중요한 것은 하나의 ARHSP는 여러 개의 누출 시나리오를 포함 가능하게 하여 지리적으로 근접한 누출 시나리오들은 하나의 분석점에서 효율적으로 통합 관리한다는

점이다. 예를 들어 누출 시나리오가 다른 경우에도 기본사상은 공유하는 경우가 많기 때문에 질문에 대한 응답 하나로 다양한 사고경위에 적용되어 분석이 효율적으로 된다. 이것은 기존의 체계에서는 볼 수 없는 것으로서 다양한 QRA 경험에 기초한 발상이다.

Num	Queries	Response	Remarks
1	Query 1	Response 1	hour
2	Query 2	Response 2	year
3	Query 3	Response 3	

Basic event name	Description	Value		Basic failure rate(lambda)	Function
Basic event 1 (BE1)		=		Value_lambda1(Extracted_D B or set)	$\text{Lambda} \times \text{Value(Re1)} \times 0.5$
Basic event 2 (BE2)		=		Value_lambda2(Extracted_D B or set)	Value(Re2)
Basic event 3 (BE3)		=		Value2_lambda3(Extracted_ DB or set)	$\text{Lambda} \times \text{Value(Re3)}$

[illegible][illegible]

- 111 -

### 5.3 ARHSP 작성 흐름도

5.3절에서는 QRA 시스템 내부에서 수행되는 ARHSP 작성 절차를 보임으로서 사용자 운영 프로그램 기능 개발에 기여코자 한다. ARHSP는 기본적으로 위험성 평가 전문가에 의해 작성되는 것이지만 이미 작성되어 있는 것에 대한 수정 작업은 안전관리자 등 모든 관계자가 할 수 있다. ARHSP 작성 전에 준비가 되어야 할 것은 분석이 될 중요 누출 시나리오 목록과 그 발생 경위들, 즉 minimal cut sets와 각 cut set 에 포함된 기본사상들에 대한 확률 함수식이다. 그리고 각 확률식에서 계산에 필요한 정보 가운데 질의로부터 답변을 통해 얻을 경우 그에 대한 질의문들이 있어야 한다. Figure 5-5는 위와 같은 준비 사항에 대한 예를 들어 도해(시)한 것이다.

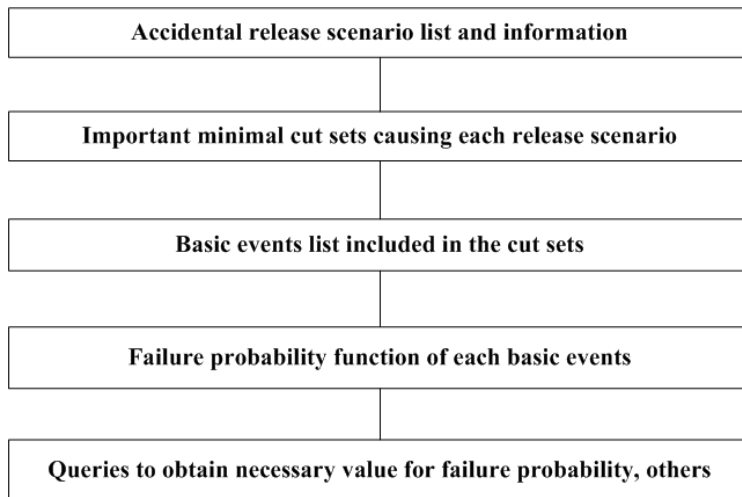


Figure 5-4 ARHSP 작성 전 준비 정보 개요

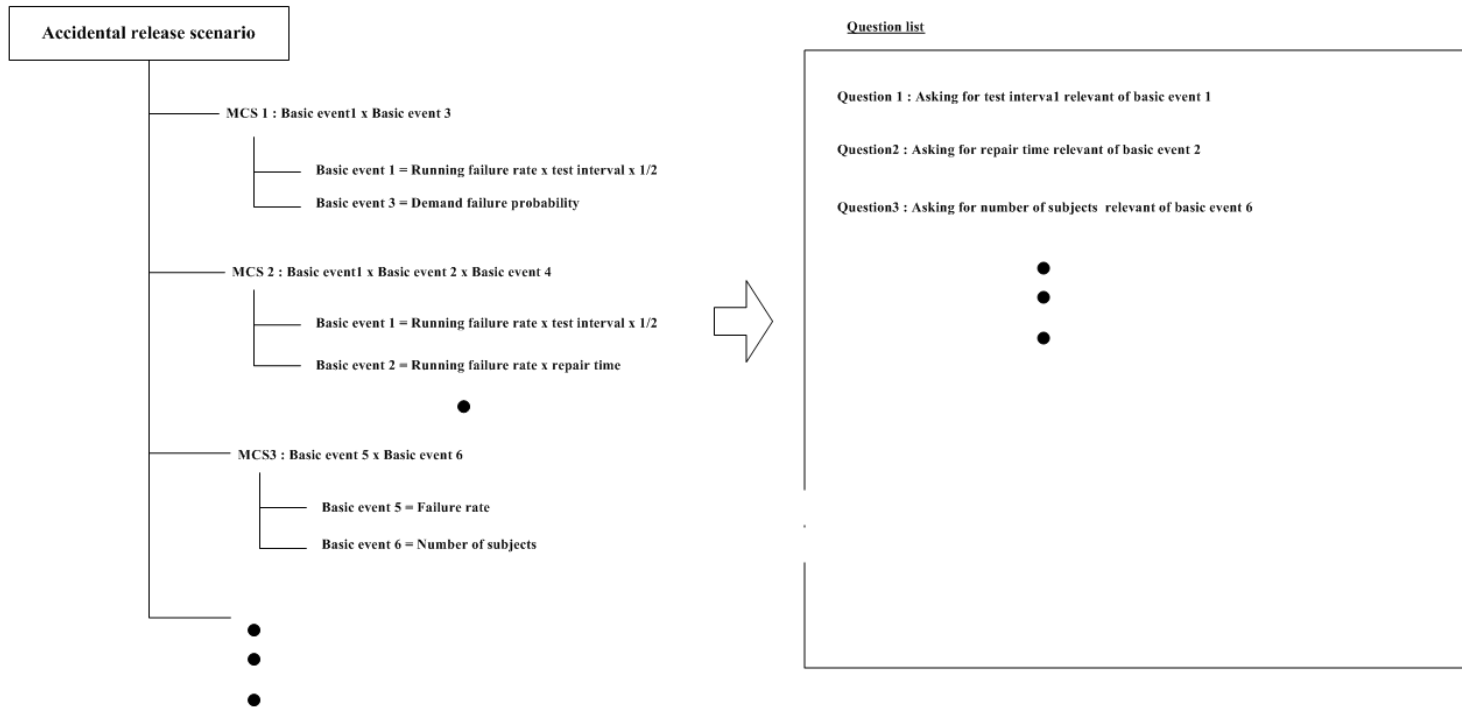


Figure 5-5 ARHSP 작성을 위한 준비 정보 개요 예시

### 5.3.1 하나의 누출 시나리오를 포함한 ARHSP 작성 흐름도

하나의 누출 시나리오에 관한 사고경위, 기본사상, 확률식을 기반으로 신규의 ARHSP를 작성하는 과정은 Figure 5-6과 같다. 하나의 누출 시나리오에는 여러 개의 minimal cut set 들이 포함되어 있으며 하나의 cut set을 선택하고 그 cut set 에 포함된 기본사상 중에서 초기사건에 해당하는 기본 사건(사상)부터 방호(protection) 기능에 관한 기본사상 순으로 명기한다. 하나의 기본사상을 선택하고 그 이름을 기본 사건 부분에 기재한 다음 계산을 위한 질의가 필요한 경우 질의 영역에 기재하고 그 응답 변수를 포함하여 확률식을 완성한다. 여기서 기본 고장률은 신뢰도 데이터 베이스와 연계된 변수를 사용할 수 있다. 이미 기본사상 부분에 기재된 것이라면 다른 기본사상에 대한 작업을 수행한다. 하나의 cut set 에 대한 설정이 마무리 되면 다음 cut set 에 대하여 위와 같은 과정을 반복하고 포함된 기본사상들에서 이미 기재된 것은 제외하고 새로운 것만을 작성한다.

모든 minimal cut set 이 작성되면 최종 사고 누출 시나리오 부분에 사고결과 분석에 필요한 입력값(물질, 인벤토리, 압력, 온도 조건 등)을 설정한다. 만일 질의를 통해 누출원 모델의 값을 설정코자 하면 그것에 적합한 질의를 질의서 부분에 입력하고 그에 상응하는 변수를 누출 시나리오에 입력한다. 마지막으로 이 누출 시나리오 최종 사고빈도 값을 계산하기 위해 관련된 사고경위들을 기재한다.

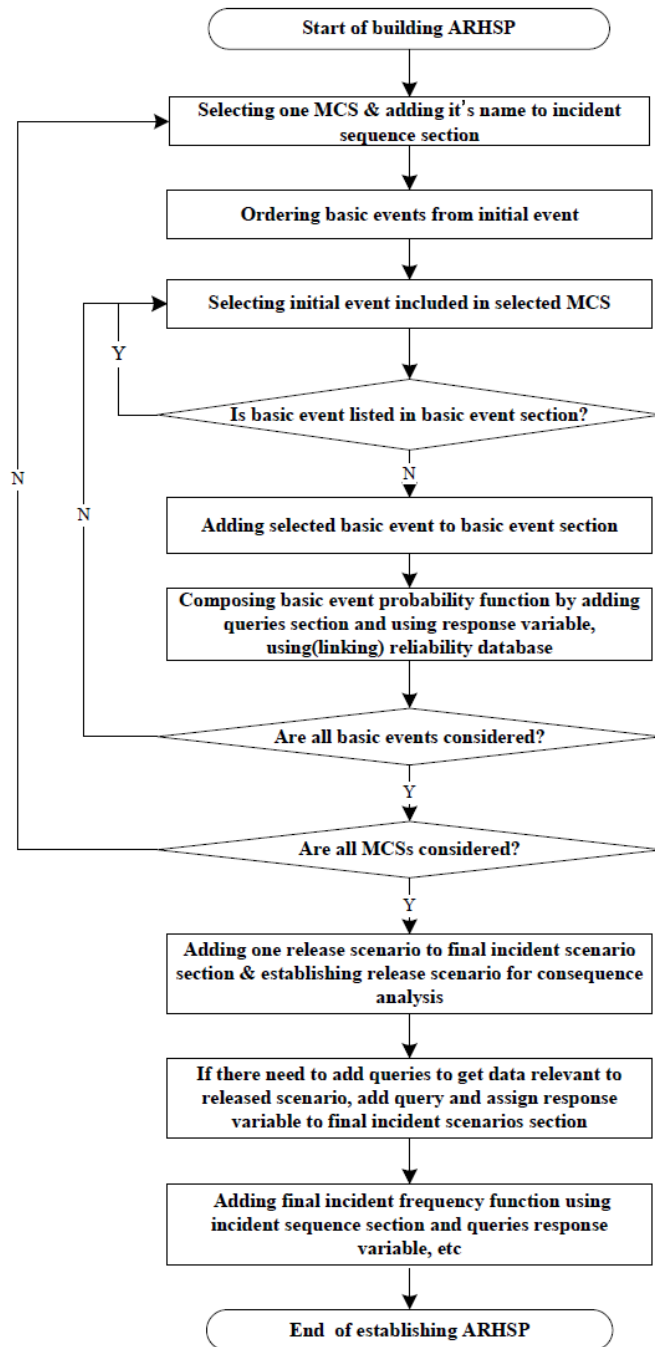


Figure 5-6 하나의 누출 시나리오에 대한 ARHSP 작성 흐름도



### 5.3.2 두개 이상의 누출 시나리오를 포함한 ARHSP 작성 흐름도

동일한 위치에서 공정의 특성상 여러 가지 누출 시나리오를 가지는 경우 개별로 ARHSP를 작성하는 것은 분석의 효율을 감소시킨다. 따라서 그런 경우에 같은 ARHSP 내부에 여러 개의 누출 시나리오를 둘 수 있고 Figure 5-7은 그에 대한 작성 흐름도이다.

이것은 하나의 누출 시나리오에 대한 과정과 유사하지만 누출 시나리오가 2개 이상이므로 각각 누출 시나리오에 대하여 반복적 설정이 수행되어야 한다.

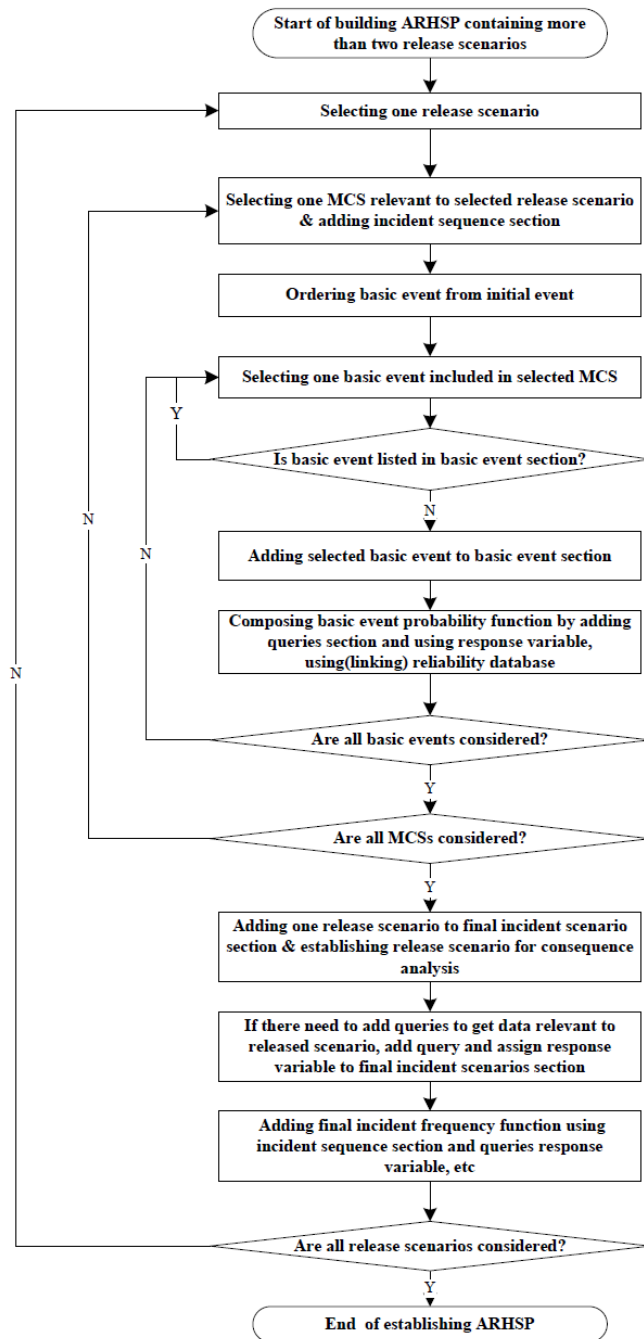


Figure 5-7 2개 이상의 누출 시나리오를 가진 ARHSP 작성 흐름도

### 5.3.3 사고결과 분석 ARHSP 개선 작성 흐름도

설계 초기 단계에서는 사고빈도 분석을 위한 정보는 없기 때문에 사고 결과분석만이 가능하다. 따라서 ARHSP 작성에 필요한 것은 최종 누출 시나리오에 관한 정보 구성만이다. Figure 5-8은 그러한 과정을 표현하고 있다. 여러 개의 누출 시나리오를 설정하고 그와 연관한 공정 정보를 질의를 통해 얻어야 하는 경우 질의문에 기재하고 그에 대한 응답 변수를 최종 누출 시나리오 부분에 명기한다.

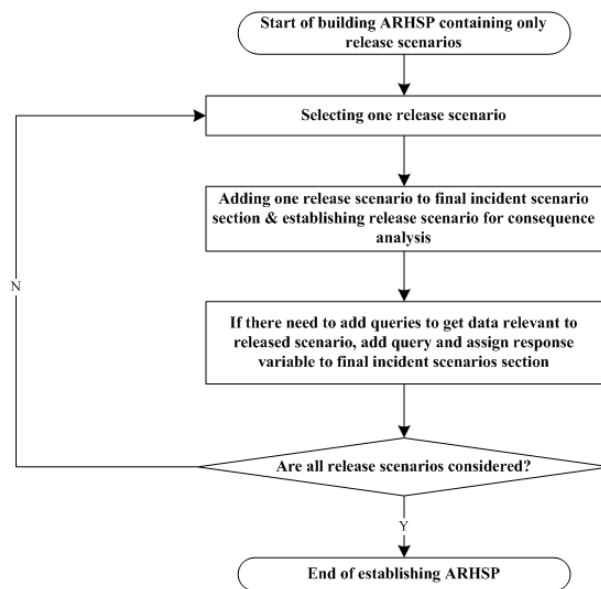


Figure 5-8 사고결과 분석만을 위한 ARHSP 작성 흐름도

이렇게 작성된 ARHSP는 상세설계 단계나 확률적 정량 분석이 이루어질 수 있는 단계에 이르면 Figure 5-9와 같은 절차대로 ARHSP를 수정한다. 이것은 도출된 사고경위와 관련한 누출 시나리오가 이미 ARHSP에 포함되어 있는 경우를 전제로 하여 작성한 것이다. 사고빈도와 관련한 정보 설정부분은 기존의 작성 방식과 동일하고 결과분석 정보는 그대로 활용하거나 수정함으로서 사고결과 분석만을 위한 ARHSP를 QRA가 될 수 있도록 개선해나간다. 이런 과정을 통해 기존의 불완전 QRA 입력 정보를 발전시키고 불필요한 반복 작업을 지양함으로서 분석의 효율성을 높이고 QRA를 쉽게 수행해나갈 수 있다.

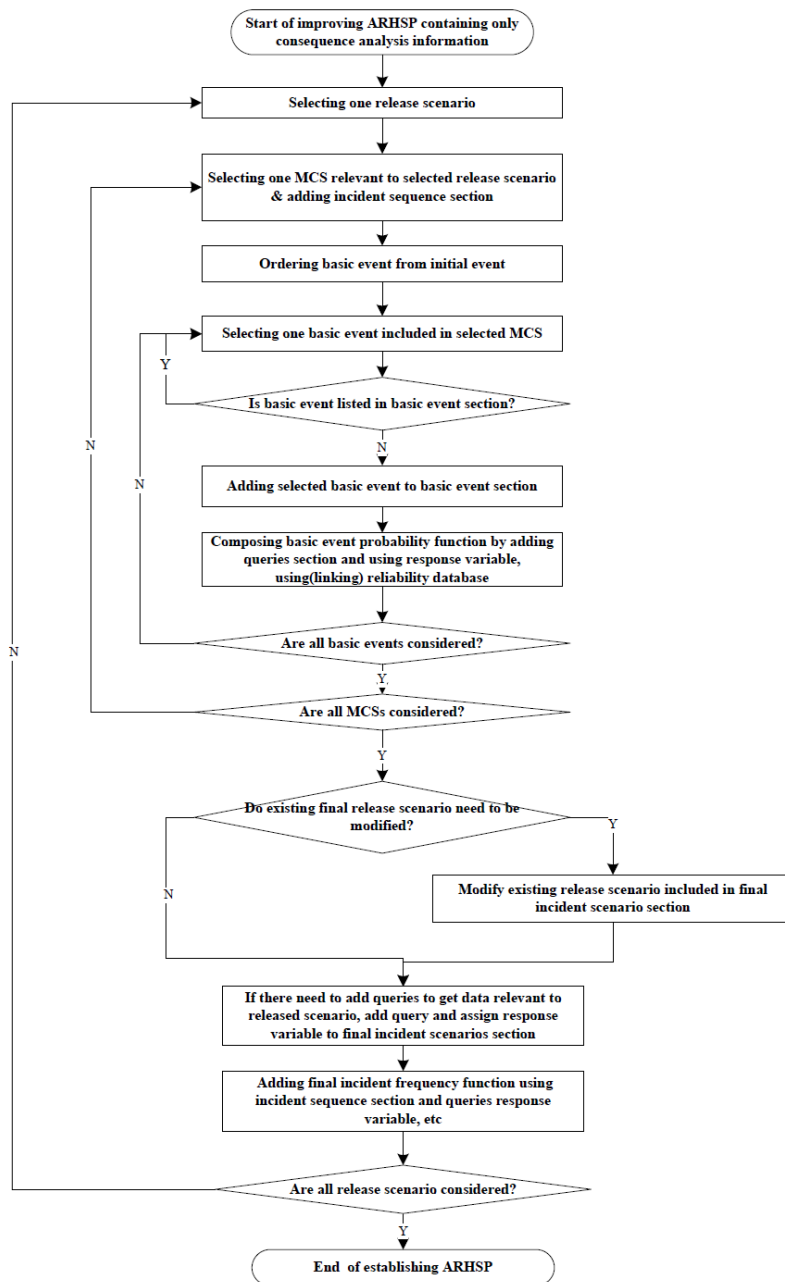


Figure 5-9 사고결과 분석 ARHSP 개선 작성 흐름도

## 5.4 제안한 QRA 플랫폼에 기반한 위험성 평가 절차

이 절에서는 ARHSP 기능이 구현된 QRA 시스템을 기반으로 한 위험성 평가 절차를 제시하였다. 기존 통합 QRA 시스템에서는 누출원 분석에 관한 정보만을 가진 분석점에 별도의 사고빈도 분석을 통해 얻어진 빈도 값을 입력하고 그것을 지도에 위치하여 실행한다. 따라서 기존 시스템은 위험요소에 관한 지식을 공유하는 도구로는 큰 효용의 가치가 없었다. 하지만 제안한 ARHSP는 사고 경위와 같은 위험 정보를 가지는 체계로서 위험요소에 대한 지식이 공유되며 그 QRA 절차가 변화가 있다.

Figure 5-10은 ARHSP를 가진 QRA 시스템을 기초로 하는 경우 정량 위험 분석 연구의 전반적인 절차와 참여자들의 주 영역을 표현한 것이다. QRA 전문가는 분석이 될 사고의 생성과 선택, 그리고 ARHSP를 작성하거나 기존의 유사한 것이 있는 경우 수정한다. 관련 담당자들은 QRA에 필요한 정보와 ARHSP를 선택하고 이를 통해 위험요소와 위험 분석 모델을 구체적으로 이해하며 의견을 제시한다. 그리고 분석에 필요한 정보를 입력하고 프로그램에 의해 계산된다. 분석 결과에 대해서는 전문가와 관계자 모두 참여하여 위험관리 의사결정을 하게 된다. 이것은 ARHSP를 통한 분업과 협력의 QRA 절차를 명확히 보여주고 있다.

이러한 QRA 절차는 공정 및 설비 정보 등의 증가에 따라 개선되어야 할 정량 위험 분석 정보를 실용적으로 관리하고 실행하는 새로운 패러다임으로서 QRA 연구의 효율성을 최대화하고 있다.

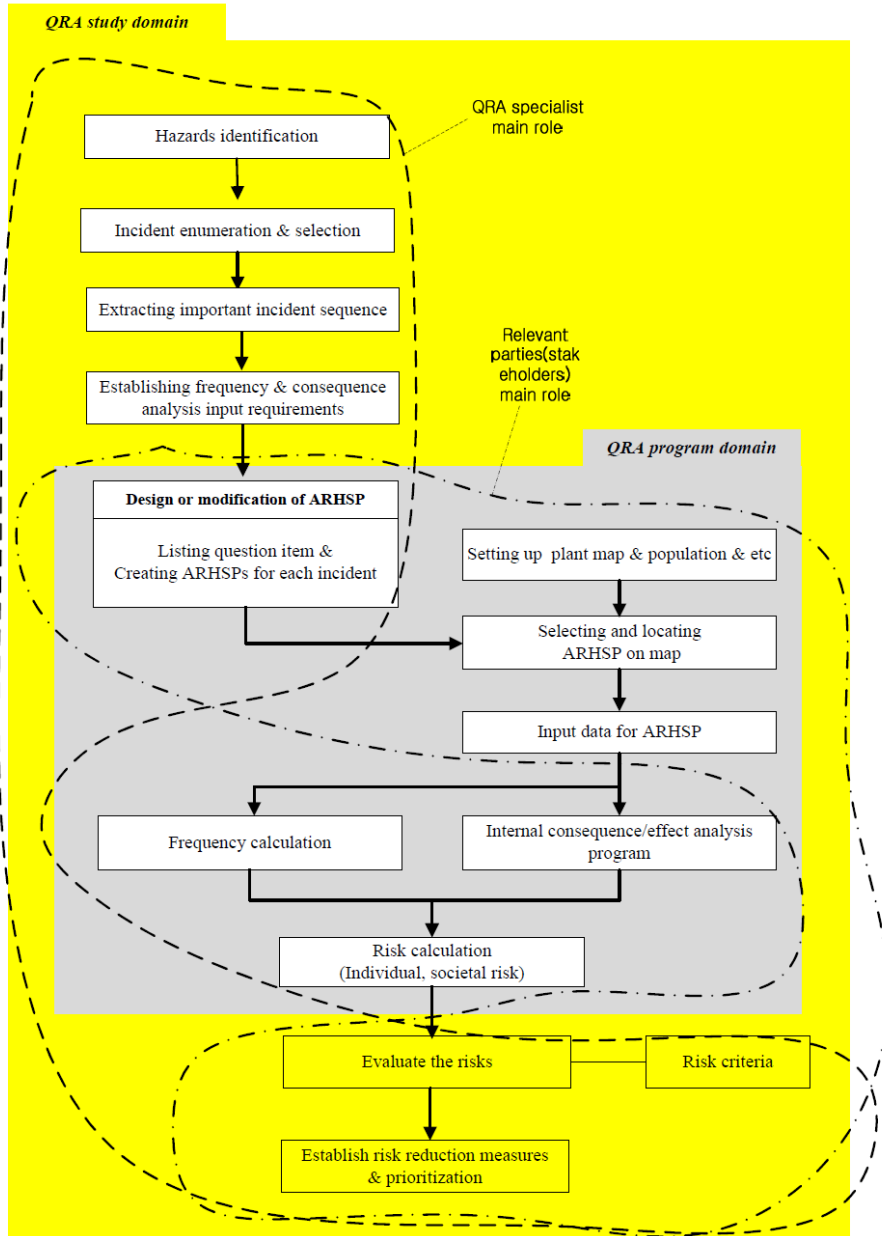


Figure 5-10 ARHSP 기반 정량적 위험성 평가 연구 일반적 절차

### 5.4.1 초기 설계 단계에서의 분석 절차

초기 설계단계에서는 공정에 대한 상세 정보가 없으며 수집 가능한 것은 물질 정보와 플랜트 위치, 주변 인구 밀도 등으로 제한되어 있다. 따라서 이 단계에서 수행할 수 있는 위험 분석의 방향은 결과분석에 국한되어 있다. 하지만 안전의 가장 궁극적인 방향인 본질 안전 정책 수립과 passive 안전 정책(예, 안전거리 결정, 다이크 설치), 비상 대응 계획을 수립하는 데 가장 중요한 단계이기도 하다. 이 단계에서의 평가 절차는 다음과 같다.

- **Step 1 : QRA 목적 정의**

위험 차원(dimension)에 대한 고려와 목적을 명확히 한다. 즉 환경, 인명, 재산 등 위험 규정이 될 대상에 대한 고려와 법령, 코드 및 표준 등을 참조하여 의사결정의 기준(예, 복사열 기준)을 수립한다.

- **Step 2 : 분석 대상 시스템 이해**

공장 인근 인구 밀도와 설계 공정 물질, 설비 위치, 환경, 기후 등을 조사한다. 이 정보는 향후 상세 설계 단계, 운전 단계의 QRA 시 재 활용하는 정보로서 관리적 측면에서 QRA 업무 속도를 향상시킨다.

- **Step 3 : 위험요소 확인**

초기 설계 단계에서 활용할 수 있는 위험요소 확인 기법은 예비위험분석(preliminary hazard analysis), 관련 기술 코드나 체크리스트 정도로 국한된다. 하지만 다양한 전문적 경험(중요한 고장이나 공정 경험 등)을 활용하여 중요한 위험요소가 분석에 누락되지 않도록 한다.



- **Step 4 : 누출 사고 정의**

도출된 위험요소를 기반으로 다루는 물질과 가상의 저장량을 기반으로 누출 시나리오를 설정한다. 코드/표준에서 지정한 누출 시나리오나 여러 문헌을 참고하여 credible 시나리오를 설정하는 것도 해당한다.

- **Step 5 : ARHSP 작성 및 위치**

정의한 누출 시나리오에 부합한 ARHSP를 5.3.3절에서 제시한 절차대로 작성한다. QRA 전문가가 작성한 ARHSP 에 대하여 이해담당자들이 검토하고 난 후 완료되면 배치도에 위치를 시킨다. 위치가 동일한 경우는 동일한 ARHSP에 다양한 누출 시나리오를 포함할 수 있다.

- **Step 6 : 결과 분석의 시행**

각 ARHSP에 내부에 설정된 누출 시나리오별 결과 분석을 시행한다. 복사열 분석, 확산 분석, 폭발 분석 등 각 ARHSP를 중심으로 거리별 그 피해 범위를 계산한다. 코드에 근거한 피해 범위에 대한 기준이나 사전에 수립된 기업의 기준과 비교한다.

- **Step 7 : 시스템 수정 및 재분석**

기준을 만족하지 못하는 경우는 시스템을 수정(물질의 조정, 저장량에 대한 검토 및 조정)하거나 설비 경계지역을 확장하여 원천적 안전성 확보 방안을 수립하여 재분석한다. 또한 결과분석의 내용을 근거로 하여 비상 대응 절차 계획을 수립하여 나가고 상세 단계에서 보다 세분화할 수 있도록 근거를 마련한다.

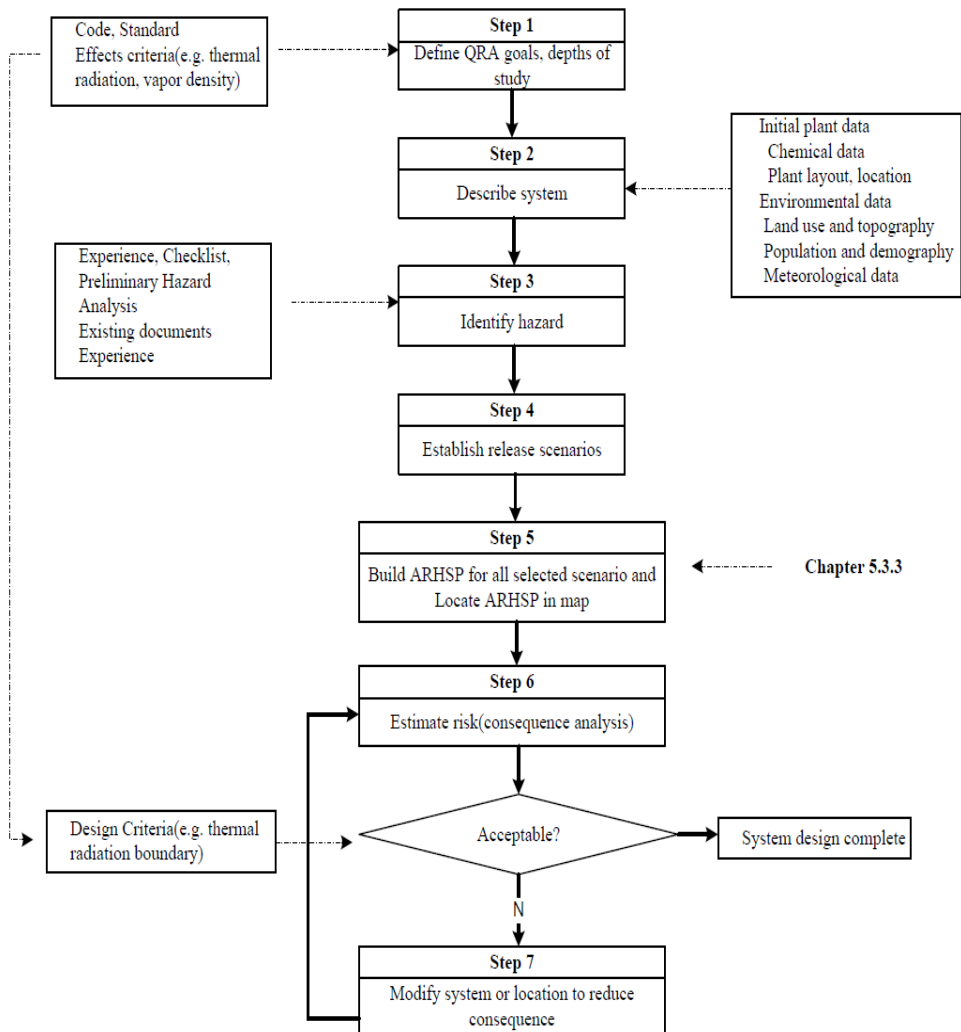


Figure 5-11 초기 설계 단계에서의 위험성 평가 절차 및 구성

## 5.4.2 상세 설계 단계에서의 분석 절차

상세 설계 단계에서는 기초 설계 단계에 고려되었던 물질, 공장 배치 및 주변 인구 밀도 등의 정보를 그대로 활용하거나 개선된 사항에 맞추어 수정하여 활용함으로써 사고결과 분석에 관한 입력 데이터 설정의 중복성을 제거한다. 그리고 새로 생성된 공정 설계를 바탕으로 전문가가 도출한 빈도분석에 필요한 사고경위, 기본사상 등을 입력하여 QRA를 완료한다. 이는 위험정보 관리 및 적용성을 높이는 효율적 패러다임이다. 이에 대한 세부 절차는 아래와 같다.

- **Step 1 : QRA 목적 정의**

상세 설계 단계부터는 QRA가 확률론적 해석이므로 개인적, 사회적 위험도 기준에 관한 코드, 표준, 법령 등을 검토하고 목적을 수립한다.

- **Step 2 : 분석 대상 시스템 이해**

초기 단계에서 수집한 정보에 덧붙여 P&ID, 사고신뢰도 데이터 수집을 통해 시스템을 이해한다.

- **Step 3 : 위험요소 확인**

공정 상세 도면이 제공되므로 보다 운전 경험뿐만 아니라 체계적인 위험요소 확인 기법인 HAZOP, FMEA 기법 등을 활용하여 위험요소를 확인한다. 여기서는 물질 자체에 대한 위험요소 보다는 사고경위에 대한 위험요소 확인을 주목적으로 한다.

- **Step 4 : 누출 사고 정의 및 선정**

확인된 위험요소를 기반으로 여러 누출 시나리오를 설정하고 QRA 대상이 될 시나리오를 선정한다. 다양한 기법을 활용할 수 있지만 중요한

누출 시나리오가 누락되지 않도록 한다.

- **Step 5 : 누출 시나리오에 대한 사고경위 및 분석 정보 준비**

분석 누출 시나리오를 담고 있는 ARHSP 가 있는 경우는 사고결과 분석 입력 정보를 그대로 활용하거나 수정한다. 그리고 그에 대한 예비 사고빈도 분석을 통해 사고 발생 확률 측면에서 중요한 사고 경위를 추출하여 ARHSP 작성과 수정을 위한 준비를 한다. 만일 분석할 누출 시나리오에 관한 ARHSP가 없는 경우는 예비 사고빈도 분석 및 누출 시나리오를 규정하고 신규 ARHSP 작성 준비를 한다.

- **Step 6 : ARHSP 작성 및 구성**

전 단계에서와 같이 ARHSP 가 있는 경우는 사고경위 정보 및 기본사상 확률식, 최종 누출 사고 시나리오의 빈도식을 설정한다. 없는 경우는 5.3절에서 제시한 절차대로 새로운 ARHSP를 작성한다.

- **Step 7 : ARHSP 위치 지정 및 위험도 분석**

작성된 ARHSP를 이용하여 공장 배치도에 위치시키고 요구하는 데이터 항목에 자료를 입력한다. 그리고 위험 분석 프로그램을 이용하여 개인적 위험도와 사회적 위험도를 분석한다.

- **Step 8 : 시스템 수정 및 재분석**

위험도 기준을 만족하지 못하는 경우 사고빈도 및 사고결과 모든 측면에서 위험도를 낮추기 위한 설계 변경안을 수립하고 적용한다. 수정안이 나오는 경우는 단계 5로 이동하여 사고경위를 간단히 수정하여 빠르게 재평가를 수행하거나 단계 2로 이동하여 새로운 위험요소가 있는지 확인하고 절차를 재수행한다.

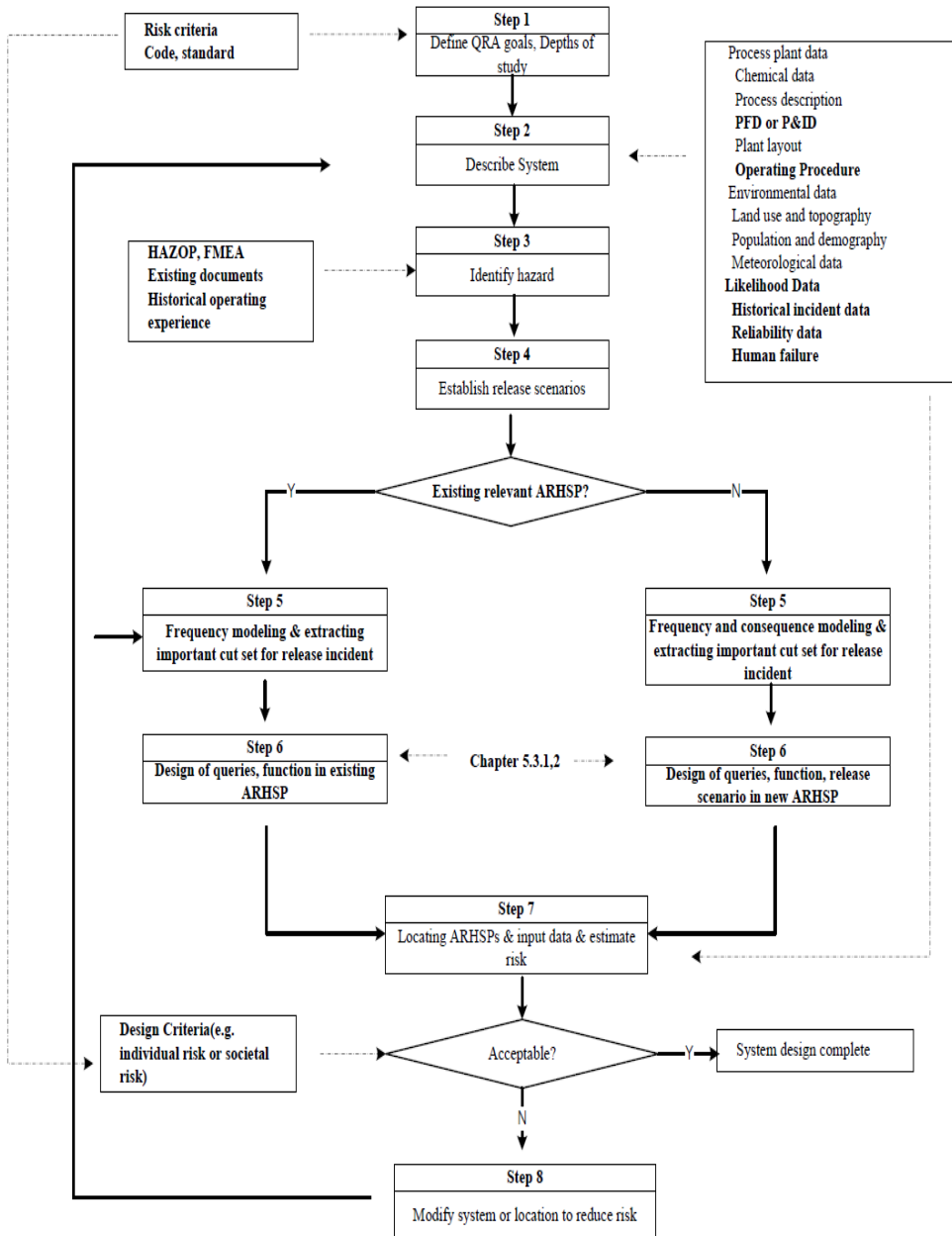


Figure 5-12 상세 설계 단계에서의 위험성 평가 절차 및 구성

### 5.4.3 설비 운영 단계에서의 분석 절차

운영 단계에서의 QRA는 상세 설계 단계에서의 QRA 모델을 연속적으로 활용하는 단계이다. 일반적으로 운영단계에서 QRA를 수행해야 하는 경우는 주기적으로 법률에 의해 QRA를 수행해야 하는 요건이 있거나 또는 사업자 스스로 설비의 변경, 운전 조건의 변경 등이 있을 때 자발적으로 QRA를 요구하는 EHS(Environment, Health, Safety) 내규가 있는 경우이다. 그리고 설비/운영 정책 최적화를 위해 위험 기반 관리 기술을 도입한 경우이다. 이와 같은 경우에 다음과 같은 절차의 QRA를 통해 그 활용도를 최대화한다.

- **Step 1 : QRA 목적 정의**

법률적 요구나 자발적 필요성에 따라 수행해야할 QRA의 목표와 범위를 설정한다. 자발적 위험관리인 경우에는 기업의 플랜트 수준에서의 위험도 기준과 단위 설비별 또는 그룹별 위험도 기준을 설정해야 한다.

- **Step 2 : 분석 대상 시스템 이해**

상세 설계 단계에서 수행했던 QRA 정보를 모두 활용하고 위험기반관리를 위한 경우는 정비나 운전 정책에 관한 데이터를 수집한다.

- **Step 3 : 새로운 위험요소 확인**

기존 설비와 운전 조건 등의 변경 등으로 인해 발생할 수 있는 새로운 위험요소에 대하여 정성적 평가 기법을 이용하여 확인하거나 또는 체크리스트를 이용하여 확인한다.

- **Step 4 : 새로운 누출 시나리오 확인**

새로운 위험요소에 따른 누출 시나리오에 대하여 확인한다.

- **Step 5 : 누출 시나리오에 대한 사고경위 및 분석 정보 준비**

새로운 위험요소와 관련한 누출 시나리오에 있어 이미 지도에 삽입된 ARHSP가 그 경우를 고려하고 있다면 사고경위에 대한 정보만을 정리한다. 없는 경우에는 새로운 누출 시나리오와 그에 대한 사고경위, 기본사상 확률식 등 관련 정보를 얻어 ARHSP 작성 준비를 한다.

- **Step 6 : ARHSP 수정 및 생성**

새로운 사고경위만을 추가되어야 할 경우라면 기존 지도에 삽입된 ARHSP를 수정한다. 새로운 누출 시나리오인 경우는 ARHSP를 생성하거나 기존의 ARHSP 에 최종 사고 누출 시나리오 부분에 정보를 추가하고 사고경위 관련 정보를 설정한다.

- **Step 7 : ARHSP 위치 지정 및 위험도 분석**

기 위치한 ARHSP에서 변경된 분석 정보가 있는 경우 데이터를 수정한다. 새로운 ARHSP는 지도에 위치하고 데이터를 입력한다. 그리고 위험 분석 프로그램을 이용하여 개인적 위험도와 사회적 위험도를 얻는다.

- **Step 8 : 시스템 수정 및 재분석**

위험도 기준을 만족하지 못하는 경우 새로운 또는 변경된 위험요소로 인해 증가된 부분 위험도가 전체 위험도 기준을 벗어나게 한 요인이다. 따라서 변경된 부분에 맞추어 위험도 감소 방안을 도출하되 전체적 관점에서 위험을 낮추기 위한 다각적인 방안을 수립해 볼 필요가 있다. 안전성 향상 방안이 수립되면 단계 5로 이동하여 사고경위를 수정하여 신속하게 재평가를 수행한다.

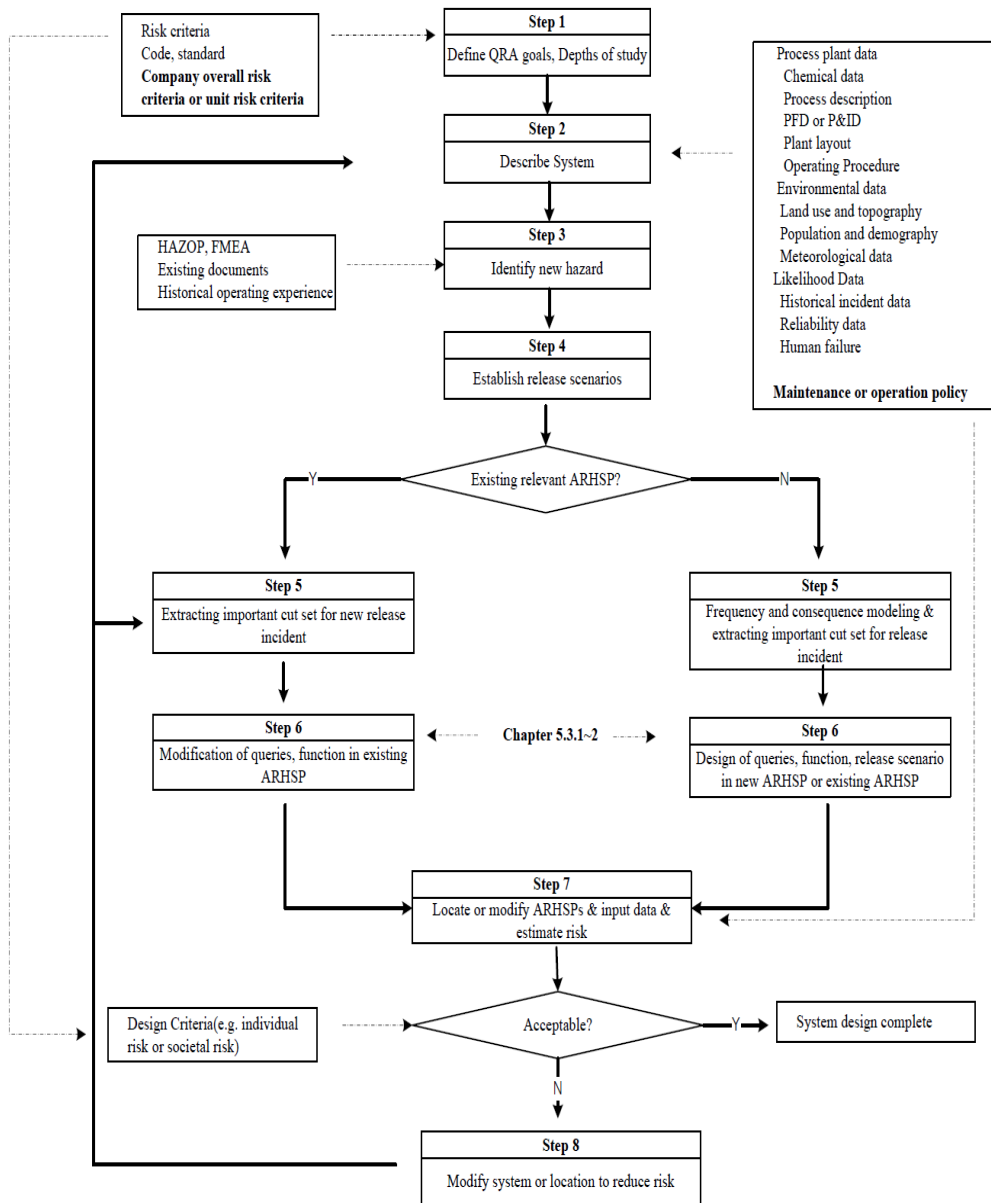


Figure 5-13 운영 단계에서의 위험성 평가 절차 및 구성



## 6. 사례 연구

본 논문에서는 제안한 ARHSP를 이용한 QRA 시스템을 구축하고 실제 현장 안전관리에 적용함으로써 그 체계의 유효성을 검증하였다. 적용된 분야는 LNG(Liquefied Natural Gas) 산업이며 현재 한국은 세계 2번째의 LNG 수입국으로서 한국의 K 사에 의해 수입되고 있고 단일 수입자로서는 세계에서 가장 큰 기업이다[82]. K 기업은 LNG를 1986년부터 수입하기 시작하였고 주로 발전 및 도시가스용으로 판매하고 있으며 그 수입량은 매년 평균 18% 정도 증가하였다. 최근 2008년 기준 그 소비량은 약 1,200 billion cubic feet 로서 한국 전체 에너지 소비량 중 14% 정도를 차지하고 있다. 이처럼 천연가스 산업이 발전한 이유는 천연가스 친환경성과 편리성으로 인해 가스 공급 인프라(LNG 인수기지 및 공급 시설)가 지속적으로 확충되었기 때문이다. 2009년을 기점으로 한국에는 총 5백40만 톤 저장 규모의 3개의 인수기지, 약 2,700km 주 배관(Transmission pipeline), 177개소의 가스 공급기지(station)가 있다.

그러나 가연성 물질인 LNG를 대량으로 저장하고 고압으로 취급하기 때문에 상당한 잠재적 위험성이 존재할 가능성이 있어 국민들은 항상 관심과 두려움을 가지고 있다. 불행하게도 1994년에 발생한 아현동 가스 폭발사고[83]는 그러한 우려가 현실로 이루어진 대표적 사례로서 12명의 사망자, 170명의 부상자와 약 100 억 원의 재산손실이 발생했으며 사업자는 혹독한 국민적 질타를 받았다. 하지만 그로 인해 그 사업자는 보다 완벽한 안전관리시스템을 구비하고 실행하는 전환점으로서 1997년에 선진 에너지 기업인 모빌사의 EHSQ 시스템을 도입하여 현재까지 철저히 적용하고 한국의 실정을 반영하여 발전시켜 나가고 있다.

또한 2000년대 초반부터 한국 LNG 산업은 계량적 위험관리를 위하여 QRA를 본격적으로 도입하기 시작하였다. 최근 전 세계적으로 LNG 생산, 저장, 취급에 있어 QRA가 점차 확산되고 있으며 그와 관련한 대표적인 사례로는 2개의 국제 표준으로서 하나는 NFPA 59A (Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas)이고 또 다른 하나는 EN 1473(Installation and equipment for liquefied natural gas - Design of onshore installations)이다. NFPA 59A 는 1967년 미국에서 생성되었고 초기엔 규범적인(prescriptive) 형태의 규격이었으나 최근 2009년 판부터는 LNG 설비의 부지선정에 있어 QRA를 이용한 방법론과 절차를 명시하고 있다[84, 94]. 다만 여기서는 규제 기관만이 평가하고 판단할 수 있다. EN 1473[85]은 유럽 공동체의 표준으로서 설비의 경계를 결정하는 기준 적용에 있어 확률화된 위험을 기초로 명시한 규격이다. 이렇듯 국제 표준들이 QRA를 이미 채용하거나 앞으로 점차 적용의 폭을 넓혀가는 추세는 QRA 가 공공에게 미치는 잠재 위험에 대하여 보다 실제적인 표현을 하도록 하여 안전성과 생산성을 모두 고려할 수 있다는 믿음에서 시작한다.

이러한 전 세계적 동향과 한국내 자발적 LNG 산업의 안전성 향상이라는 명제 아래 제안한 방법론에 기반한 2개의 사례연구를 수행함으로써 그 유효성을 명확히 보이고자 하였다.

## 6.1 사례 1 : 가스시설에 대한 웹기반 QRA 시스템 구축과 적용

### 6.1.1 적용 개요

일반적으로 천연가스 공급 시설은 사용의 편리성과 위험성을 동시에 부가하기 때문에 안전관리를 실행하는 것이 매우 어렵다. 특히 땅속에 매설된 가스 배관보다는 여러 기계들로 구성된 공급 가스 시설의 위험이 보다 높아 어려운 위험관리 대상이 된다. 이것은 과거 가스 시설에서 실제로 사상자가 발생하는 사고를 분석한 결과에서 배관보다는 밸브나 단위 파트와 깊게 연관되어 있다는 기존 연구 결과[86]가 잘 말해주고 있다. 또한 도시 확대로 인하여 공급설비 인접에 있는 민간인 거주자 수가 점차 증가하는 점, 그리고 주민들 시야에 바로 노출되어 있어 매설된 배관보다는 상대적으로 높은 관심이 된다는 점들은 가스 시설이 매우 까다로운 안전관리 대상임을 알 수 있다.

이에 본 논문에서는 제시한 방법론의 효과를 확인하기 위하여 첫 번째 사례로서 가스 공급시설에 대한 효율적 QRA 수행을 위한 웹 기반의 QRA 시스템을 구축하고 적용하였다. 그리고 관련 산업의 실제 위험관리 업무에 적용한 결과를 통해 현장에서의 QRA 적용의 어려움을 최소화하는 방법으로서의 타당성이 있음을 증명하였다.

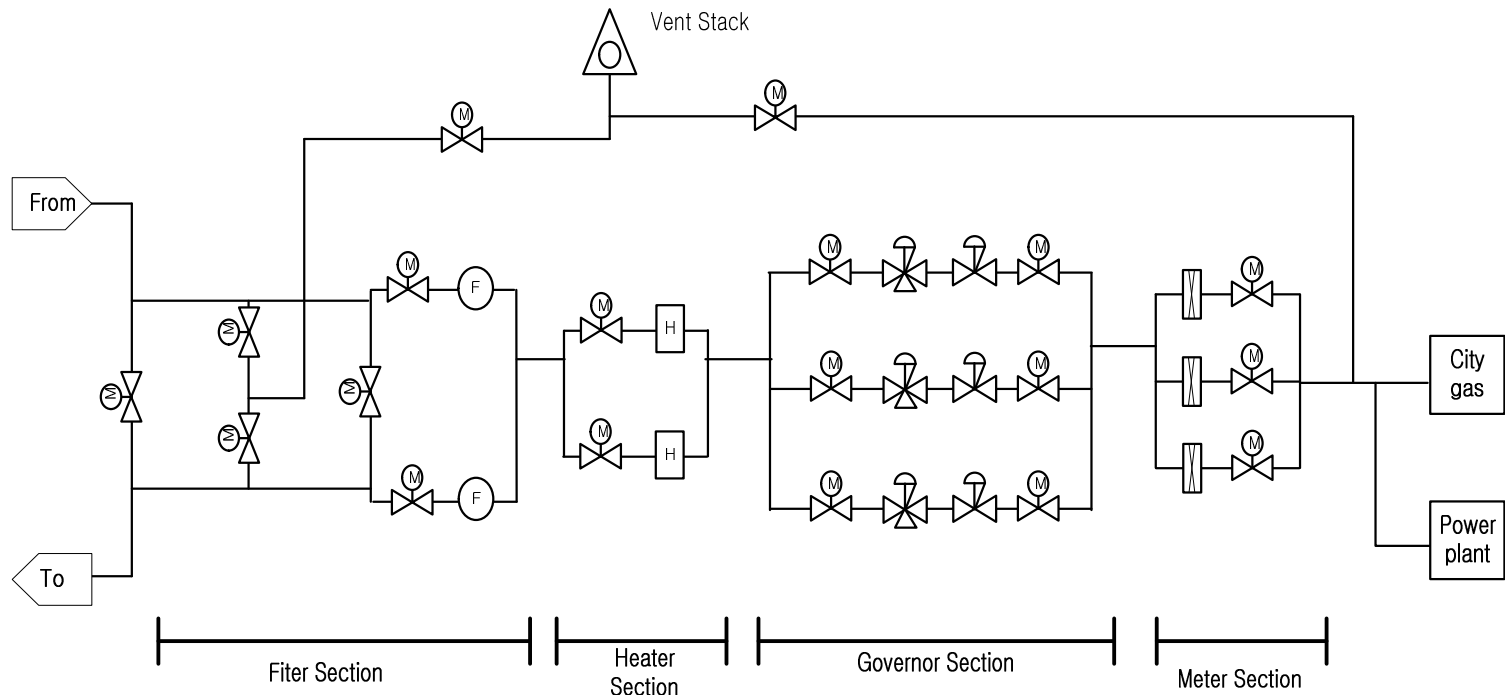


Figure 6-1 가스공급시설의 프로세스 구성도

### 6.1.2 천연가스 공급시설에 대한 이해와 ARHSP 작성 사전 준비

가스공급시설은 LNG 인수기지에서 약 7 ~ 8 MPa 로 기화되어 송출된 천연가스를 도시 가스사나 발전사로 공급을 하기 위해 가스 정압, 차단, 방산 등의 기능을 수행하는 설비로서 크게 세 가지 유형으로 나누어 볼 수 있다. 그것은 정압기지, 밸브기지, 블록밸브이다. 정압기지는 압력을 낮추는 기능을 수행하는 시설이며 밸브기지와 블록밸브는 단순 가스 차단 역할을 수행한다. 다만 밸브기지는 차후 정압기지로 변경될 수 있는 큰 규모의 시설로서 블록밸브와는 다른 차이가 있다. 정압기지에는 일반적으로 Figure 6-1에서 보는 바와 같이 필터설비, 히터설비, 정압설비, 계량설비 영역으로 구성되고 해당 설비가 있다. 필터설비는 정압기나 계량기 손상을 방지하기 위하여 그 전단에 이 물질을 필터링하는 설비이다. 히터는 가스 감압시 발생하는 저온 현상으로 인하여 잠재적으로 발생할 수 있는 설비 손상을 방지하기 위해 가스를 가열하는 설비이다. 정압설비는 각 후단별 설정압력에 따라 압력을 감압하는 기기로서 일반적으로 도시 가스사로는 약 0.8 Mpa, 발전사로는 약 3 Mpa 로 감압하여 보내준다. 방산탑(벤트 스택)은 배관 구간에서 누출 사고나 긴급 상황이 발생한 경우 또는 시설 보수시 차단 구간내의 가스를 대기중으로 안전하게 방출하기 위한 설비이다. 일반적으로 정압기는 밀폐된 실내에 설치되고 필터, 히터, 계량설비는 외부에 설치되어 있다.

대상 설비들에 대한 이해와 구성을 바탕으로 Figure 6-2에서 보는 바와 같이 총 6개의 ARHSP를 설정하였다. 그것은 필터설비 ARHSP, 히터설비 ARHSP, 정압설비 ARHSP, 계량설비 ARHSP, 그리고 밸브기지 및 블록밸브는 단순하므로 각각 밸브기지 ARHSP, 블록밸브 ARHSP이다. 각

ARHSP에서 포함될 누출 사고 시나리오를 도출하기 위하여 기존 QRA 연구 보고서, HAZOP 결과물과 도면을 검토하였다. 최종적으로 고려된 누출 시나리오와 누출 직경에 대한 사항은 Table 6-1과 같으며 누출 크기의 규정은 대누출(100mm, 중누출(50mm), 소누출(10mm)로 정리하였다. 누출 크기를 정하는 것은 참고할 수 있는 데이터의 유무와 관련이 있으며 만일 누출 크기를 정하더라도 그에 적합한 누출률 데이터가 없다면 QRA 수행이 어렵다. 적용된 누출 고장률과 기기적 작동실패에 관한 데이터는 K사에서 자체 구축한 고장률 데이터베이스[87]와 HSE에서 발간한 HSR2001 보고서[88]를 활용하여 도출한 것이다.



Table 6-1 (사례분석1) 고려된 누출 사고 시나리오 및 결과 분석 유형

ARHSP	누출 사고 시나리오 및 누출 직경	결과분석 모델
전체 공통 사항	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지진(100mm hole)</li> <li>• 홍수(100mm hole)</li> <li>• 비행기 추락(100mm hole)</li> <li>• 외부차량 충돌(인접 고가)(100mm hole)</li> <li>• 내부공사(크레인 등 전도)(100mm hole)</li> <li>• 외부인 침입(10mm hole)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flash 화재</li> <li>- Jet 화재</li> </ul>
정압설비 ARHSP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 설비별(플랜지, PCV) 기계적 건전성 상실에 의한 누출(10mm, 50mm, 100mm)</li> <li>• 배관 기계적 건전성 상실에 의한 누출(100mm hole)</li> <li>• 수동 및 전동밸브(MOV, HV) 기계적 건전성 상실에 의한 누출(10mm hole)</li> <li>• PV(purge valve) 누출(10mm hole)</li> <li>• 압력 상승 및 방출 실패로 인한 누출(100mm hole)</li> <li>• 보수 중 전후단 차단 밸브 spurious open에 의한 누출(100mm hole)</li> <li>• PSV spurious open(10mm hole)-외부누출</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 외부형</li> <li>- Flash 화재</li> <li>- Jet 화재</li> <li>• 밀폐형</li> <li>- 폭발</li> </ul>
히터설비 ARHSP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 설비별(밸브, 플랜지, 히터) 기계적 건전성 상실에 의한 누출(10mm, 50mm, 100mm)</li> <li>• 배관 기계적 건전성 상실에 의한 누출(100mm hole)</li> <li>• 수동 및 전동밸브(MOV) 기계적 건전성 상실에 의한 누출(10mm hole)</li> <li>• PV(purge valve) 누출(10mm hole)</li> <li>• 보수 중 전후단 차단 밸브 spurious open에 의한 누출(100mm hole)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 외부형</li> <li>- Flash 화재</li> <li>- Jet 화재</li> <li>• 밀폐형</li> <li>- 폭발</li> </ul>
필터설비 ARHSP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 각 설비 유형별(플랜지, 필터) 기계적 건전성 상실에 의한 누출(10mm, 50mm, 100mm)</li> <li>• 수동 및 전동밸브(MOV) 기계적 건전성 상실에 의한 누출(10mm hole)</li> <li>• 배관 기계적 건전성 상실에 의한 누출(100mm hole)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 외부형</li> <li>- 확산</li> <li>- Jet 화재</li> <li>• 밀폐형</li> <li>- 폭발</li> </ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PV(purge valve) 누출(100mm hole)</li> <li>• 보수 중 전후단 차단 밸브 spurious open에 의한 누출(100mm hole)</li> </ul>	
계량 설비 ARHSP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 각 설비 유형별(플랜지, 계량기) 기계적 건전성 상실에 의한 누출(10mm, 50mm, 100mm)</li> <li>• 수동 및 전동밸브(MOV) 기계적 건전성 상실에 의한 누출(10mm hole)</li> <li>• 배관 기계적 건전성 상실에 의한 누출(100mm hole)</li> <li>• PV(purge valve) 누출(10mm hole)</li> <li>• 보수 중 전후단 차단 밸브 spurious open에 의한 누출(100mm hole)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 외부형</li> <li>- 확산</li> <li>- Jet 화재</li> <li>• 밀폐형</li> <li>- 폭발</li> </ul>

고려된 시나리오에서 단일 누출 사건이 아닌 연속적 고장에 의한 사고인 경우, 그 중요 경위에 대한 분석을 위해 fault tree 분석을 하였다. 수립된 fault tree는 정압설비에서 정압기 유형별로 과압 형성(상승, 급상승)과 차단 실패, 안전밸브 실패로 인한 100mm hole 누출 사건이며 한국원자력연구소의 KIRAP[89]을 이용해 작성했다. Figure 6-3은 정압기 유형이 Worker PCV(pressure control valve) & Monitor PCV 이고 전단 차단 밸브가 MOV 로 구성된 정압설비에서 압력 상승 고장 모드로 인한 누출 사고에 대하여 작성한 fault tree를 보여 주고 있다.

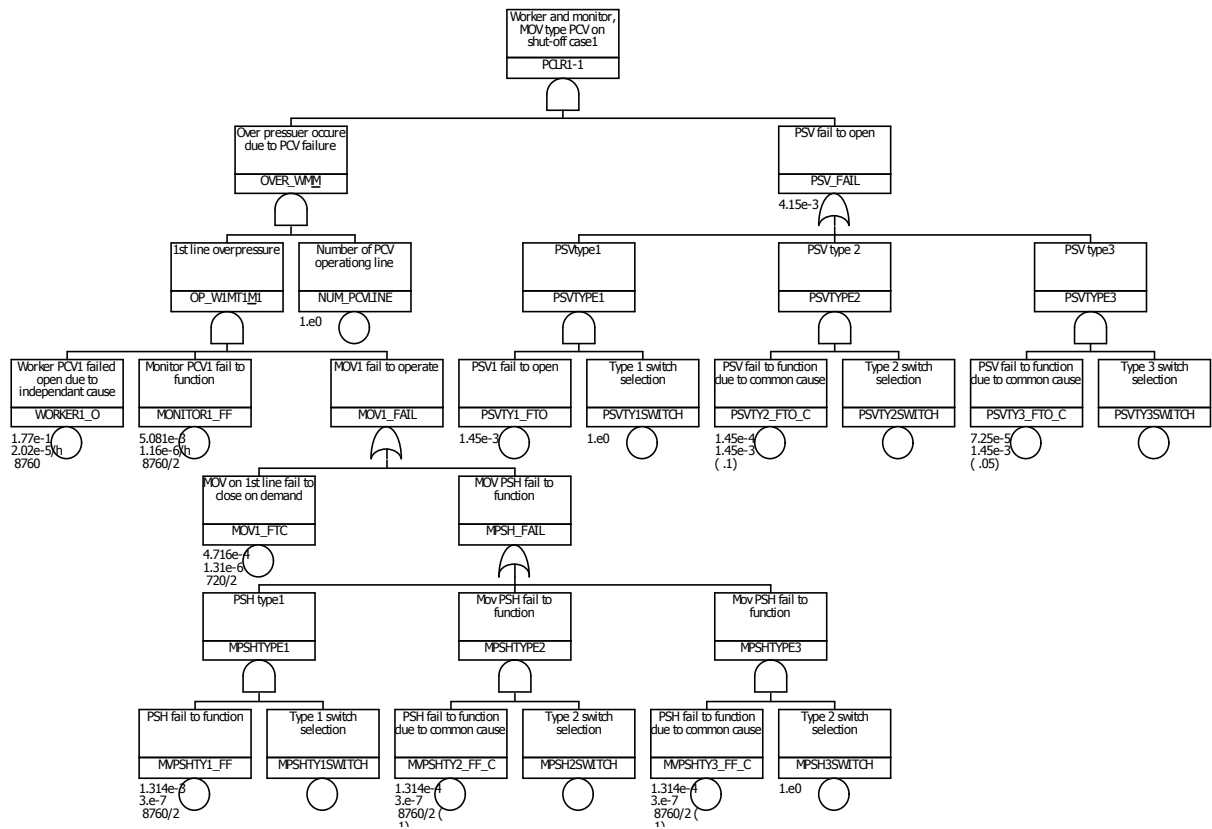


Figure 6-3 정압설비 압력상승 고장모드로 인한 대누출 사고 fault tree 작성 모델 예시

정압설비 유형과 비상차단 밸브를 작동시키는 PSH(pressure switch high)의 구성, PSV(pressure safety valve) 구성에 따라 중요한 minimal cut set 들이 생성되었다. Figure 6-4는 정압설비에서의 대누출(100mm hole) 사고 경위들과 그에 포함된 기본사상들의 확률식이며 Table 6-2는 그 누출 사고빈도 계산을 위해 필요한 기본고장률을 제외한 분석 패러미터를 얻기 위한 질의문 예이다.

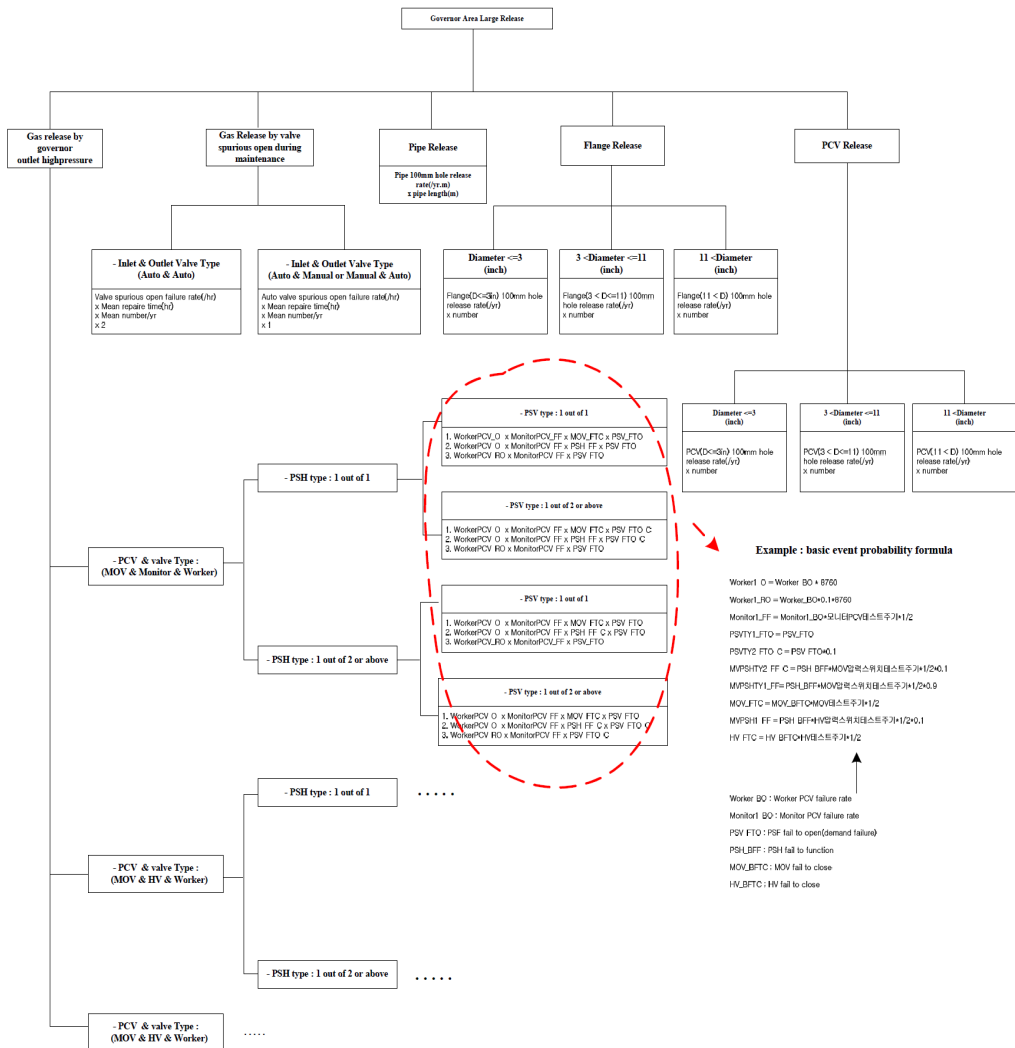


Figure 6-4 정압설비 대누출 사고경위 및 관련 기본사상들

Table 6-2 정압설비 ARHSP 작성을 위한 질의문 예시

Num	Question list
1	Worker type?
	1) MOV + Moniter + Worker
	2) MOV + HV + Worker
	3) MOV + Worker
2	Inlet pressure?
	(9, 20, 30, 50, 70kg/cm <sup>2</sup> 중 선택)
3	PCV inlet & outlet type?
	1) Manual & PCV & Auto or Auto & PCV & Manual
	2) Auto & PCV & Auto
	3) Manual & PCV & Manual
4	PSV number?
5	MOV PSH number?
6	MOV numbers?
7	PV numbers?
8	Manual valve numbers?
9	HV numbers?
10	PCV line numbers?
	1) Less than 4 inch
	2) 4inch~11inch
	3) More than 11 inch
11	Flange numbers?
	1) Less than 4 inch
	2) 4inch~11inch
	3) More than 11 inch
12	PSV proof test interval?
13	Monitor PCV test interval?
14	MOV test interval?
15	MOV PSH test interval?
16	HV PSH test interval?
17	HV test interval?
18	PCV overhaul
	1)Mean number: /year
	2)Mean overhaul time: hr
19	Pipeline length?
20	Governor building space
	1) volume(m <sup>3</sup> )
	2) vent hole area(m <sup>2</sup> )

### 6.1.3 가스 공급시설에 대한 QRA 시스템 구축

제안한 ARHSP 체계를 바탕으로 하여 가스 공급시설에 대한 QRA 프로그램을 웹 기반 시스템으로 구축하였다. 이 시스템은 비주얼 스튜디오 2005로 구현하였으며 데이터베이스는 SQL Server 2005를 사용하였다. 설계한 QRA 시스템의 기본 구조는 Figure 6-5에서 보는 바와 같이 전문가와 일반 사용자 모듈로 구성하였다.

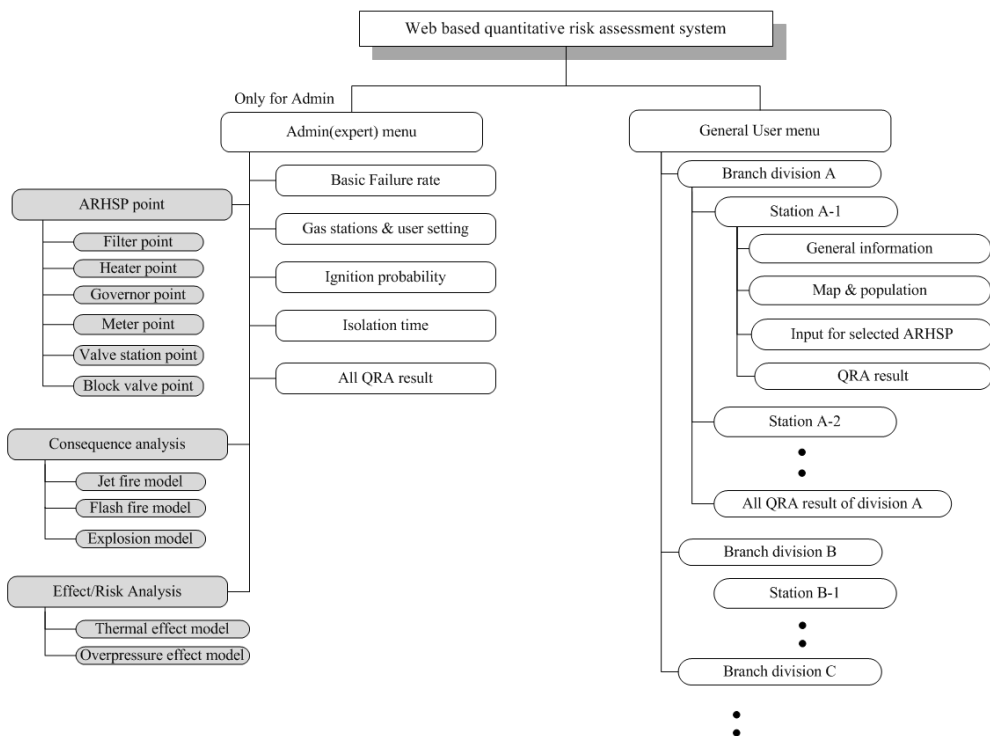


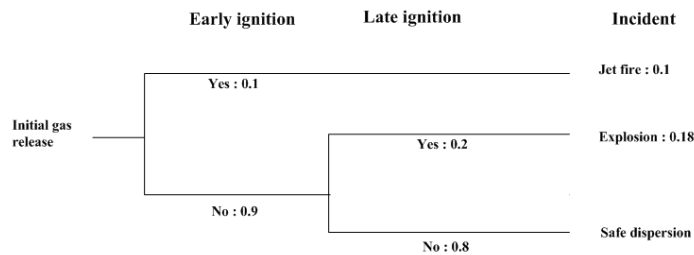
Figure 6-5 개발한 가스 공급 시설에 대한 QRA 시스템 구조 개요도

- 관리 모듈

시스템 관리 모듈은 분석 모듈로 이동하기 각 관할 대상 시설에 대한 평가 결과를 일목요연하게 보거나 전문가 접촉인 경우 위험 분석에 필요한 패러미터를 설정하는 모듈로 이동하는 주 통로이다.

본 사례 분석에서 활용키 위한 점화율 산출을 위한 event tree는 내부누출과 외부누출로 나누어 Figure 6-6과 같이 설정했다. 초기점화인 경우는 제트화재로, 지연점화인 경우는 실내는 폭발로, 실외는 Flash 화재로 규정했다.

#### Internal release



#### External release

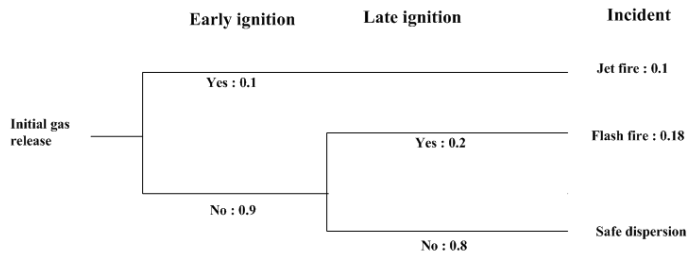


Figure 6-6 가스설비 QRA에 적용한 점화확률

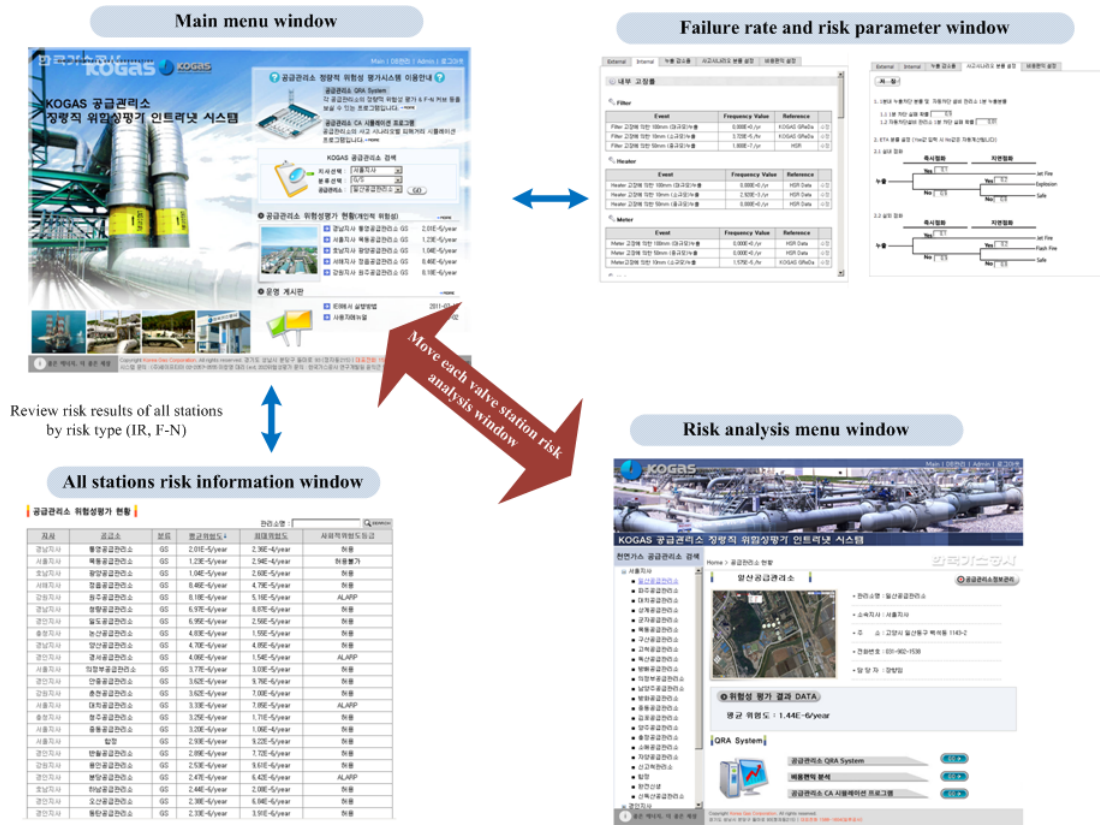


Figure 6-7 구축한 가스시설에 대한 QRA 시스템 메인 관리 모듈

## • 분석 모듈

분석 모듈은 설비 정보 입력 모듈과 결과 모듈로서 크게 2가지로 구성하였다. 전자는 위험분석에 필요한 ARHSP 선택, 위치 및 인구밀도 설정, 설비에 대한 정보를 입력하는 모듈이고 후자는 QRA 분석 결과로서 개인적, 사회적 위험도를 확인토록 하는 모듈이다. 분석 모듈은 이 연구에서 제안한 ARHSP개념을 가지고 설계한 것이며 6.1.2절에서 세운 질의문과 수식을 내장하고 있다.

Figure 6-8에서 보는 바와 같이 질의문은 고정식으로 개발하였고 해당되는 ARHSP를 선택, 요구하는 데이터를 입력하면 QRA가 수행되도록 설계했다. 데이터 입력후 사고빈도와 사고결과 분석 모듈을 구동하는 프로그램은 사용자의 편의성을 위해 시스템 내장형으로 개발하였다.

정량적 위험도 분석을 위해 필요한 사고결과 분석 모듈은 CCPS의 Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis 에 제시되어 있는 누출 및 화재, 폭발 모델을 활용하였다[5]. 규정된 누출 시나리오(크기와 압력 등)에서 가스 누출속도(량) 산정을 하기 위해 CCPS의 누출원 모델을 적용하였다. 그리고 jet fire 복사열 산정은 API 521 모델을 적용하였고 flash fire의 경우에는 light gas dispersion 모델인 가우지안(gaussian) 모델을 적용했다. 정압실은 밀폐공간이기 때문에에서 가스 누출과 점화시 폭발 해석이 필요하다. 따라서 이를 위해서는 NFPA 68[90]에서 제시하고 있는 밀폐 공간 폭발 모델을 활용하였다. 복사열과 폭발로 인한 사람의 사망률을 얻기 위한 영향 평가 모델은 Eisenberg 식[5, 91]을 적용하였으며 다만 flash fire 인 경우는 100% LEL 영역내를 사망률이 1라는 영향을 받는 것으로 가정하였다.



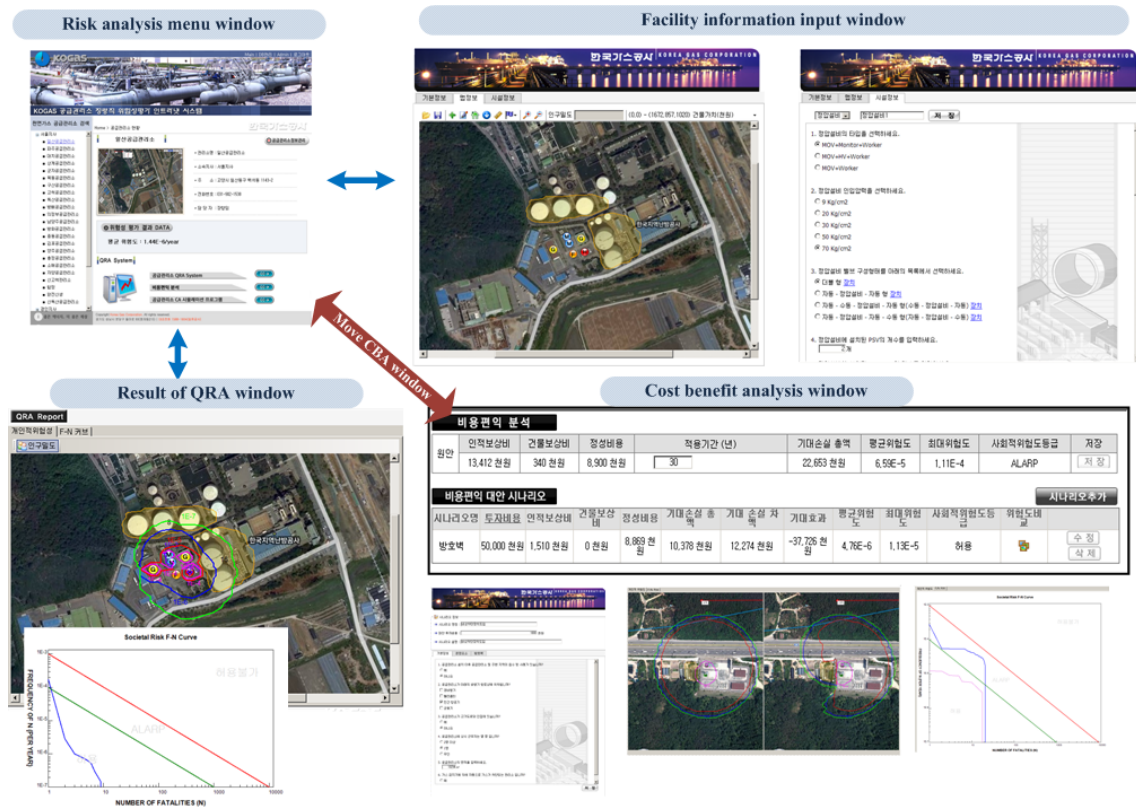


Figure 6-8 구축한 가스시설에 대한 QRA 분석 정보 입력 및 결과 모듈

#### 6.1.4 개발 시스템 적용과 고찰

구축된 가스 공급시설에 대한 QRA 시스템을 실제 현장 위험관리 업무에 적용하였다. 분석 대상이 된 가스 시설은 97개 정압기지와 52개의 밸브기지, 4개의 노출형 블록 밸브로서 총 153개소이다. 제안한 방법론의 유효성 가운데 협력(분업)을 통한 QRA 효율성이 증가함을 확인하기 위하여 QRA 전문가가 아닌 관련 설비 안전 담당자들을 통해 분석하였다. 대상으로 삼은 153개소는 8개 지역으로 나누어져 관리되므로 각 지역의 안전관리자 8명에게 QRA 일반 개념과 구축한 시스템 사용법을 3일간 교육하였다. 그리고 각 소속 사무소로 돌아가 각 관리 시설들을 평가토록 하였다. 각 지역별 담당자들이 관할하는 가스시설의 개수는 조금씩 다르지만 실제 모든 분석이 완료되는 데 소요된 시간은 약 4개월이다. 결과적으로 Table 6-3에서 보는 바와 같이 위험요소의 확인과 ARHSP를 생성하는 데 약 6개월 정도가 소요되었으므로 총합 10 개월에 걸쳐 QRA 전문가 2명과 안전관리자 8명, 즉 10명이 153 개소를 평가한 것이다.

이러한 결과를 바탕으로 제안한 체계가 분석 시간측면에서 얼마나 효율적인지를 살펴보기 위해 CCPS에서 제시하는 QRA 수준별 필요 시간을 기초로 하여 153개 공급시설에 대한 예측 시간을 산출하고 비교하였다. 사례1에 대한 QRA 수준은 Table 3-6에서 보였던 바와 같이 Complex/Risk QRA 이다. 다만 공정의 규모가 작으므로 가이드라인에서 제시하는 최소시간을 정압기지에 적용하고 밸브기지(V/S)와 블록밸브(B/V)는 정압기지 분석 시간의 50% 정도가 소요된다고 가정하였다. 또한 시설의 유사성과 반복 효과로 인해 각 단계별 분석 시간이 90% 감소할 것이라고 판단하고 적용하였다. 이와 같은 사항을 반영하여 예측하면 Table 6-4과 같이 나타낼 수 있으며 총합적으로는 약 3.6년 정도로 예상할

수 있다.

결국 제안한 방법론에 기반하여 평가한 시간을 보수적으로 약 1년 정도의 시간의 소요된다고 판단할 때 3.6년과 비교하면 실질적으로 약 60% 정도의 분석 기간을 축소한 것을 알 수 있다.

하지만 이것은 단순 산술상의 비교일 뿐이다. 새로운 가스 시설이 건설되는 경우 기초 설계단계에서 업무담당자들이 설계 정보를 기반으로 QRA를 자체적으로 할 수 있는 점, 주기적 QRA를 업무담당자들이 변경된 주변 인구 밀도 및 시설 정보를 업데이트하여 보다 쉽게 수행할 수 있는 점은 기존의 복잡하고 공학적 위험 분석 작업을 보편적 업무로 전환한 매우 의미 있는 결과이다.

Table 6-3 개발 시스템을 이용한 153 개 가스시설 QRA 소요 시간

분석 절차	소요 시간	분석 담당자
모든 유형의 가스 시설에 대한 위험요소 확인	3 개월	QRA specialist
ARHSP 작성	3 개월	
데이터 수집 및 입력	2 개월	Relevant parties
위험 정량화 및 보고서 작업	2 개월	
총 소요 시간	10 개월 (1 year)	

Table 6-4 CCPS 가이드라인에 근거한 153 개 가스시설 QRA 예측 소요 시간

분석 절차		Complex/Risk QRA		
		가이드라인	(person-week) 적용	
			V/S, B/S	G/S
데이터 수집	Base	4 ~ 8	0.2	0.4
	지원 및 반복 효과(90% 감소)	0.4 ~ 0.8		
위험요소 확인/ 누출 사고 선택	Base	4 ~ 8	0.2	0.4
	반복 효과(90% 감소)	0.4 ~ 0.8		
사고결과 분석	Base	3 ~ 10	0.1	0.1
	반복 효과(95% 감소)	0.1 ~ 0.5		
사고빈도 분석	Base	3 ~ 20	0.1	0.3
	반복 효과(90% 감소)	0.3 ~ 2		
위험도 정량화	Base	2 ~ 5	0.1	0.2
	반복 효과(90% 감소)	0.2 ~ 0.5		
보고서 작업	Base	2 ~ 8	0.1	0.2
	반복 효과(90% 감소)	0.2 ~ 0.8		
소 계	Base	18 ~ 59	0.8	1.6
	반복 효과 고려	1.6 ~ 5.4		
가스 시설 개수			57	96
예측 시간 소계			45.6	153.6
예측 총 시간			199.2(3.6 year)	

## 6.2 사례 2 : 유연한 ARHSP 기능을 가진 웹기반 LNG 플랜트 정량적 위험성 평가 시스템 구축과 적용

### 6.2.1 적용 개요

사례 1은 ARHSP를 QRA 시스템 내장형으로 개발하고 적용한 것으로서 ARHSP를 기반으로 한 QRA 효과 가운데, 협력성(분업성)으로 인한 분석 효율성이 증가한다는 것을 실질적으로 보인 사례이다. 하지만 사고 시나리오에 대한 이해성, 위험 분석 정보의 연속적 발전성은 보여주지 못했다. 이에 사례 2를 통해 제안한 ARHSP 설계 및 시스템 구성을 보다 충실하게 반영한 시스템을 개발하고 적용한 결과를 보임으로서 본 논문에서 주장하고 있는 검토성, 연속성에 대한 효과를 확인해보았다.

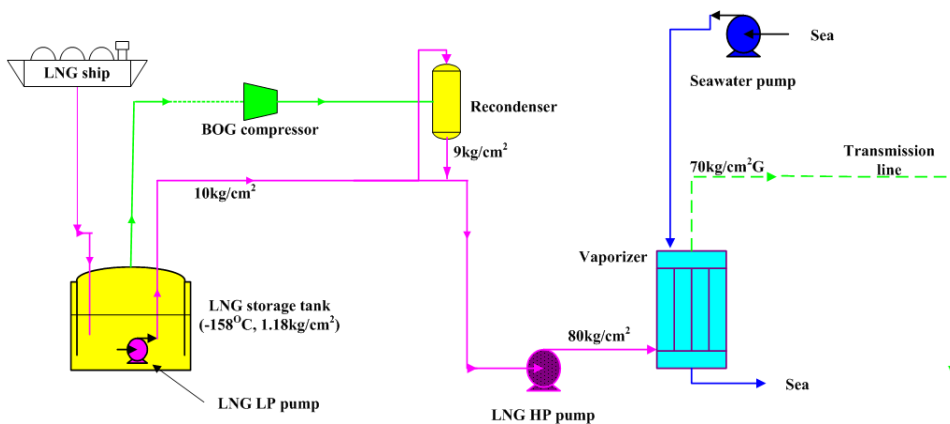


Figure 6-9 LNG 인수기지 설비 공정 개요도

## 6.2.2 LNG 인수시설에 대한 이해와 ARHSP 작성 사전 준비

LNG 인수시설의 공정의 개요도는 Figure 6-9와 같다. 세계 여러 국가로 수입한 LNG는 운반선에서 하역암(unloading arm)과 하역배관을 통해 지상 저장탱크로 이송된다. 일반적으로 저장용량 130,000m<sup>3</sup>의 LNG 선박은 최대 175mbar의 포화압력상태로 인수기지에 도착하게 되며 선박내의 펌프를 이용하여 약 12시간 동안 30인치 이상의 배관을 통해 육상의 저장탱크로 하역을 실시한다. 저장된 LNG는 저장탱크 내부의 저압펌프(LP pump)를 통해 약 10 ~ 13kg/cm<sup>2</sup>로 고압펌프(HP pump)로 이송이 된다. 고압펌프는 이렇게 저압펌프로 들어온 LNG를 약 80kg/cm<sup>2</sup>로 증압하며 증압된 LNG는 해수식 또는 연소식 기화기를 통해 NG로 열교환되어 매설전송배관을 통해 전국으로 공급된다. LNG 저장탱크 및 배관, 설비 등에서 자연 발생된 BOG는(boil off gas) 증발가스압축기에 의해 압축되며 약 10kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 재액화기로 보내어져 저압펌프로 이송중인 LNG와 만나 응축되고 액화된다.

본 사례 분석에서는 LNG 인수기지의 여러 설비들 가운데, 가장 중요하다고 판단하는 LNG 탱크와 하역설비들에 대한 ARHSP를 작성하였다. 저장탱크는 크게 3가지 유형으로 구분되는 데 그것은 Single, Double, Full containment 이다. 한국의 LNG 탱크는 대부분은 Full containment 탱크로서 Double 탱크와의 가장 큰 차이는 내조 손상시 발생하는 BOG를 통제할 수 있다는 점이다. 초저온의 가연성 액체를 대용량으로 가지고 있기 때문에 탱크 운전시의 불안정성에 대비하여 여러 종류의 안전 시스템이 장착되어 있다. 특히 가장 중요한 위험요소인 고압에 의한 탱크 파손을 방지하기 위하여 1차적으로 Flaring 시스템이 있으며 2차적인 안전장치로는 3개 이상의 PRV(pressure relief valve)가 있다. 저압에 대해서도

Make-up Gas 설비가 있으며 2차적인 안전장치로는 부압안전밸브 (Vacuum breaker)가 6개 이상이 있다. Overflow를 방지하기 위한 안전장치로는 LTD system, 2개의 Servo Level Gauge, Capacitance Sensor Probe 가 있으며 LAH, LAHH를 두어 alarm 및 자동 Shutdown 인트록(interlock)이 설치돼 있다. 롤오버(rollover)가 발생할 가능성을 대비하여 탱크 하부 주입 배관이 Stand Pipe 이며 Jet Mixing 라인을 두어 탱크에 있는 펌프에서 토출된 LNG를 회수토록 한다. 또한 LTD system을 통해 여러 액위에서 밀도분포를 측정 감시토록 하고 있다. 보냉(insulation) 공간의 LNG 누출을 감지하기 위하여 주기적 메탄 성분 분석 및 온도감지기가 설치되어 있다. Bottom slab에도 수십여 개의 온도 감지기를 두어 Base 동결을 상시 감시한다.

LNG 하역설비는 전체 공정가운데 가장 불안정한 공정으로서 빈번한 초저온 설비 연결과 분리로 인해 LNG 의 누출 가능성이 상대적으로 높은 곳이다. 하역암(unloading arm)은 LNG 선박과 지상의 배관을 연결시키는 설비로서 일반적으로 platform에 3기의 LNG 하역암, 1기의 BOG 반송 가스암, 1기 선박 디젤공급 암이 부착되어있다. 하역암은 비상시에는 퍼크(PERC)라는 긴급 분리 장치가 작동되어 선박으로부터 언로딩암을 긴급 분리하여 하역설비를 보호하며 LNG운반선에서 하역이 완전히 끝나면 하역암과 분기관에 남아 있는 LNG를 하역설비 드레인 Drum으로 회수 후 하역배관으로 이송한다.

위와 같은 인수기지에 대한 이해와 기존의 안전성 평가 보고서를 바탕으로 LNG 탱크와 하역설비에 대한 주요 누출 시나리오를 Table 6-5와 같이 선정하였다. 선정된 시나리오를 가지고 ARHSP 작성 준비를 위해 fault tree 모델을 수립했다. Figure 6-10은 하역설비에서 하역중 LNG 선

의 이탈 발생시 긴급 분리 실패로 인한 대규모누출(100mm hole)에 대한 fault tree 작성 예이다. Figure 6-11 과 Figure 6-12 는 LNG 탱크 설비 지역에서 인출입 라인에서의 대규모 누출과 탱크 지붕 파손에 대한 fault tree 작성 예이다.

Table 6-5 (사례분석 2)고려된 누출 사고 시나리오 및 결과 분석 유형

ARHSP	누출 사고 시나리오 및 누출 직경	결과분석 모델
하역설비 ARHSP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기기적 건전성 상실에 의한 LNG 누출(50mm, 100mm hole)</li> <li>• 배관 격리와 배관내 boil gas 방출 실패로 인한 LNG 누출(100mm hole)</li> <li>• 언로딩 연결 체결부 불완전성으로 인한 LNG 누출 (50mm, 100mm hole)</li> <li>• 하역중 LNG 선박 이탈로 인한 하역암 파손과 그로 인한 LNG 누출(100mm hole)</li> <li>• LNG 드레인 드럼의 기기적 건전성 상실에 의한 LNG 누출(50mm, 100mm hole)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flash 화재</li> <li>- Jet 화재</li> <li>- Pool 화재</li> </ul>
저장설비 ARHSP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LNG 탱크 지붕 파손에 의한 LNG pool(탱크 단면적)</li> <li>• LNG 탱크 인출입 배관 및 밸브에서의 기기적 건전성 상실에 의한 LNG 누출(50mm, 100mm hole)</li> <li>• LNG 탱크 라인에서의 배관 격리와 배관내 boil gas 방출 실패로 인한 LNG 누출(100mm hole)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flash 화재</li> <li>- Jet 화재</li> <li>- Pool 화재</li> </ul>



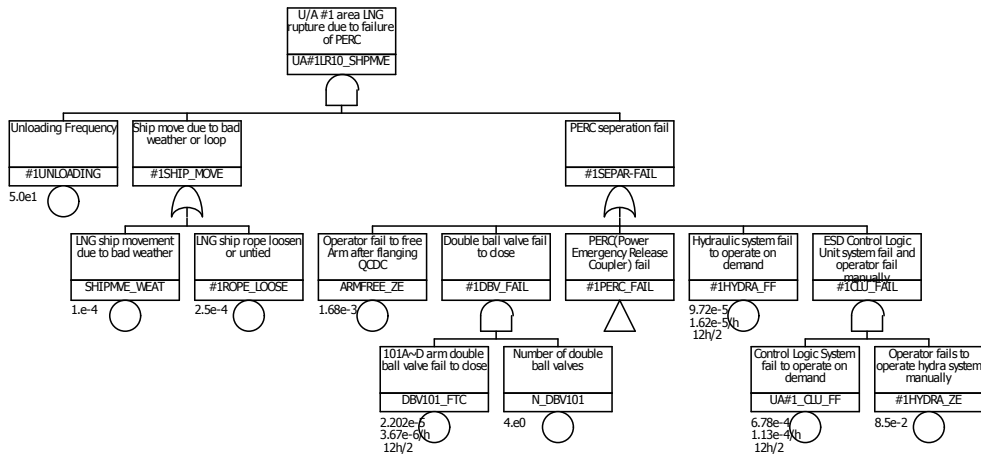


Figure 6-10 LNG 선 이탈로 인한 누출 사고 fault tree 작성 예

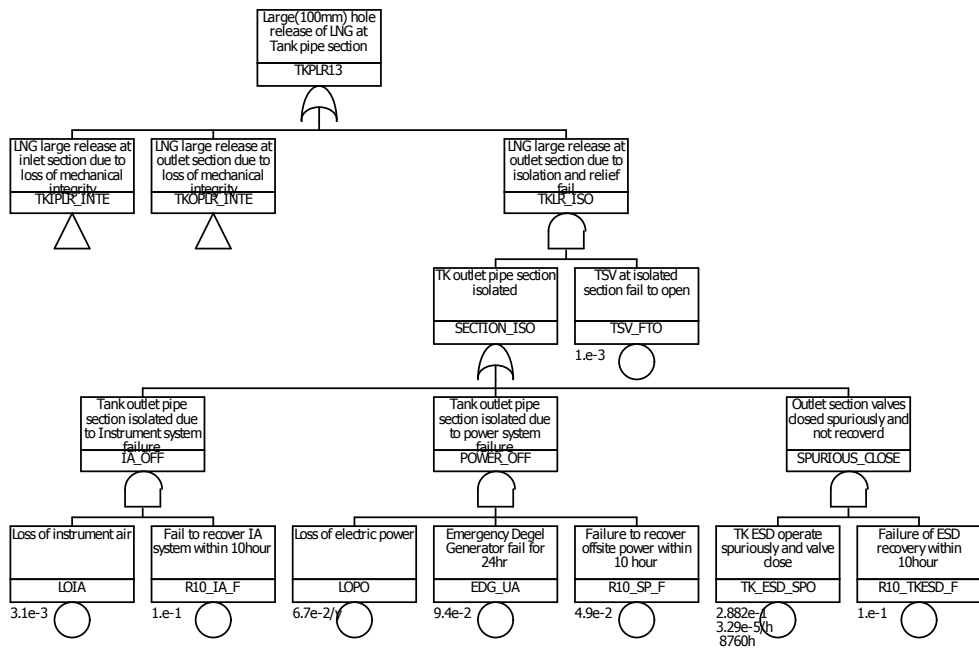


Figure 6-11 탱크 인출입 라인에서 누출 사고 fault tree 작성 예

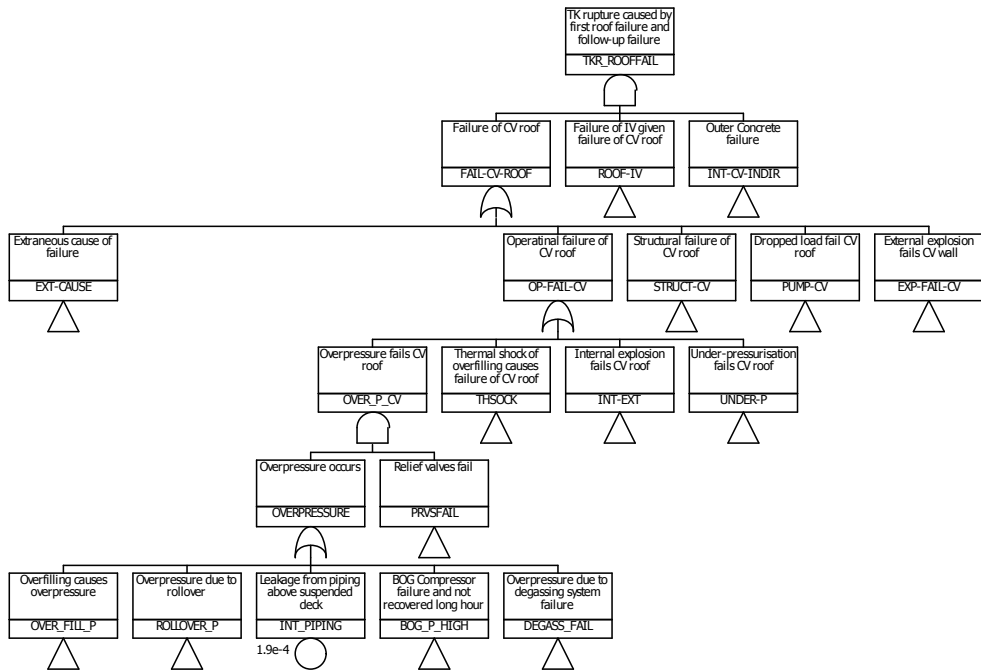


Figure 6-12 LNG 탱크 지붕 파손에 대한 fault tree 작성 예

작성된 fault tree를 이용하여 중요한 사고 경위를 얻기 위하여 먼저 일반 신뢰도 데이터와 대략적인 관리 정보를 입력하여 분석하였다. 여기서 cut off 값을  $1 \times 10^{-7}/\text{yr}$  로 적용하고 도출한 MCS를 기초로 질의, 기본 확률, 사고빈도 식들을 산출하였다. Table 6-6은 하역설비 ARHSP 에 내부 질의 및 관련 수식들, 설정한 누출 시나리오를 보여주고 있다.

Table 6-6 하역설비 ARHSP 내부 질의 및 수식, 경위, 누출 시나리오

질의문(queries)		
R	질의	비고
1	연간 하역 빈도는 얼마입니까	회
2	PERC 의 테스트주기는 얼마입니까	hr
3	LNG PERC 는 몇 개입니까	개수
4	하역설비지역의 4인치 이상 11인치 이하 크기의 LNG 밸브는 몇 개입니까	개수
5	하역설비 지역의 12인 이상 크기의 LNG 밸브는 몇 개입니까	개수
6	하역설비 라인의 degassing 시스템에서 LT(level transmitter)의 주기적 점검주기는?	hr
7	하역설비 라인의 TSV 는 몇 개입니까	개수
8	하역설비 지역의 8인치 이상의 LNG 배관의 길이는 얼마입니까?	meter
9	하역설비 라인의 degassing 시스템에서 TI(Temperature indicator)의 주기적 점검주기는?	hr
10	하역설비 유압시스템 점검주기(즉, 하역시간)는 얼마입니까	hr
11	PERC 점검주기(즉, 하역시간)는 얼마입니까	hr
12	LNG PERC 용 더블 볼 밸브는 몇 개입니까	개수
13	하역설비 드레인 드럼 용량은?	m3
14	하역설비 드레인 드럼내 운전 압력은?	bar
15	하역설비지역의 LNG 배관중 최대 직경은 얼마입니까?	밀리미터
기본사상(basic event and probability function)		
#1UNLOADING	R1	
#1PERC_FF	PERC_FF_B * R2/2	
N_#1PERC	R3	
#1ROPE_LOOSE	ROPE_LOOSE_B	
UAESD_SPO	ESD_SPO_B * 8760	
UARV_ZE	UARV_ZE_B	
R10_UAESD_F	R10_ESD_F_B	
SHIPMVE_WEAT	SHIPMVE_WEAT_B	
N_UA#1MV	R4	
UA#1MV_EXLR	LNG_MV_EXLR_B	
N_UA#1LV	R5	
UA#1LV_EXLR	LNG_LV_EXLR_B	
LT11003_FF	LNG_LT_FF_B	
ARMFREE_ZE	ARMFEE_ZE_B	

N_TSV001	R7				
TSV001_FTO	LNG_TSV_FTO_B *0.9				
M_UA#1LP	R8				
UA#1LP_EXLR	LP_EXLR_B				
TI11004_FF	TI_FF_B * R9/2				
TI11010_FF	TI_FF_B * R9/2				
LT11002_FF	LT_FF_B * R6/2				
#1HYDRA_FF	HYDRA_FF_B * R10/2				
N_DBV101	R12				
DBV101_FTC	DBV_FTC_B * R11/2				
R10_IA_F	R10_IA_F_B				
LOIA	LOIA_B				
R10_SP_F	R10_SP_F_B				
LOPO	LOPO_B				
EDG_UA	EDG_UA_B				
UA#1LV_EXMR	LNG_LV_EXMR_B				
UA#1MV_EXMR	LNG_MV_EXMR_B				
UA#1LP_EXMR	LNG_LP_EXMR_B				
UA#1R_HIWIND	HIGH_WIND				
UA#1R_CRCRASH	CAR_CRASH				
UA#1R_SEISMIC	SEISIMIC				
UA#1R_PLCRASH	PLANE_CRASH				
D103_EXLR	LNG_DRUM_EXLR				
D103_EXLR	LNG_DRUM_EXMR				
사고경위(incident sequence)					
I1	#1UNLOADING	#1ROPE_LOOSE	#1PERC_FF	N_#1PERC	
I2	UA#1MV_EXLR	N_UA#1MV			
I3	UA#1LV_EXLR	N_UA#1LV			
I4	#1UNLOADING	SHIPMVE_WEAT	#1PERC_FF	N_#1PERC	
I5	UAESD_SPO	R10_UAESD_F	UARV_ZE	LT11003_FF	
I6	#1UNLOADING	#1ROPE_LOOSE	ARMFREE_ZE		
I7	UAESD_SPO	R10_UAESD_F	UARV_ZE	TSV001_FTO	N_TSV001
I8	#1UNLOADING	SHIPMVE_WEAT	ARMFREE_ZE		
I9	UA#1LP_EXLR	M_UA#1LP			
I10	UAESD_SPO	R10_UAESD_F	UARV_ZE	TI11004_FF	
I11	UAESD_SPO	R10_UAESD_F	UARV_ZE	TI11010_FF	
I12	UAESD_SPO	R10_UAESD_F	UARV_ZE	LT11002_FF	

I13	#1UNLOADING	#1ROPE_LOOSE	#1HYDRA_FF		
I14	LOIA	R10_IA_F	TSV001_FTO	N_TSV001	
I15	LOPO	EDG_UA	R10_SP_F	TSV001_FTO	N_TSV001
I16	#1UNLOADING	#1ROPE_LOOSE	DBV101_FTC	N_DBV101	
I17	N_UA#1LV	UA#1LV_EXMR			
I18	N_UA#1MV	UA#1MV_EXMR			
I19	M_UA#1LP	UA#1LP_EXMR			
I20	UA#1R_HIWIND				
I21	UA#1R_CRCRASH				
I22	UA#1R_SEISMIC				
I23	UA#1R_PLCRASH				
I24	D103_EXLR				
I25	D104_EXMR				
<b>최종 누출 시나리오(release scenario &amp; frequency)</b>					
S1	100mm hole, LNG, 10bar, 용량 10,000kg, -162도 수직 0.5, 수평 05 Frequency = I1 + I2 + . . . + I16				
S2	50mm hole, LNG 10bar, 용량 10,000kg, -162도 수직 0.5, 수평 0.5 Frequency = I17 + I18 + I19				
S3	Hole size : R15(from query section), LNG 10bar, 용량 10,000kg, -162도 수직 0.5, 수평 05 Frequency = I20 + I21 + I22 + I23				
S4	100mm hole, LNG, 압력 : R14 bar(from query section), 용량 : R13 kg(from query section) 수직 0.5, 수평 05 Frequency = I24				
S4	50mm hole, LNG, 압력 : R14 bar(from query section), 용량 : R13 kg(from query section) 수직 0.5, 수평 05 Frequency = I25				

### 6.2.3 시스템 구축과 적용

LNG 플랜트에 대한 QRA 시스템은 본 논문에서 제안한 Figure 5-2의 시스템 구성을 보다 충실히 반영하여 웹 기반으로 구축하였고 전체 구성도는 Figure 6-13과 같다. 웹기반 어플리케이션은 정적인 HTML을 기반으로 하고 있기 때문에 동시에 여러 사용자가 운영할 수 있는 장점은 있으나 비주얼하고 상호 운영적인 사용자 운영화면을 구축하는 데는 적절하지 않다. 구현된 시스템은 마이크로소프트의 웹 브라우저 플러그인 기술인 실버라이트 기술을 통해 비주얼한 사용자 화면을 구현하여 웹의 장점을 살리면서도 비주얼한 인터페이스를 구현함으로써 웹이 가지는 장점을 살리고 단점은 극복하도록 설계되었다. 비주얼스튜디오는 실버라이트 기반 응용어플리케이션 개발을 지원하는 유일한 개발 환경이므로 비주얼 스튜디오를 사용하여 개발하면 실버라이트 개발과 웹 서버 개발을 이원화 하지 않고 일원화 하여 개발함으로써 개발 효율성을 높이고 개발 방법을 통일화시키는 장점이 있다.

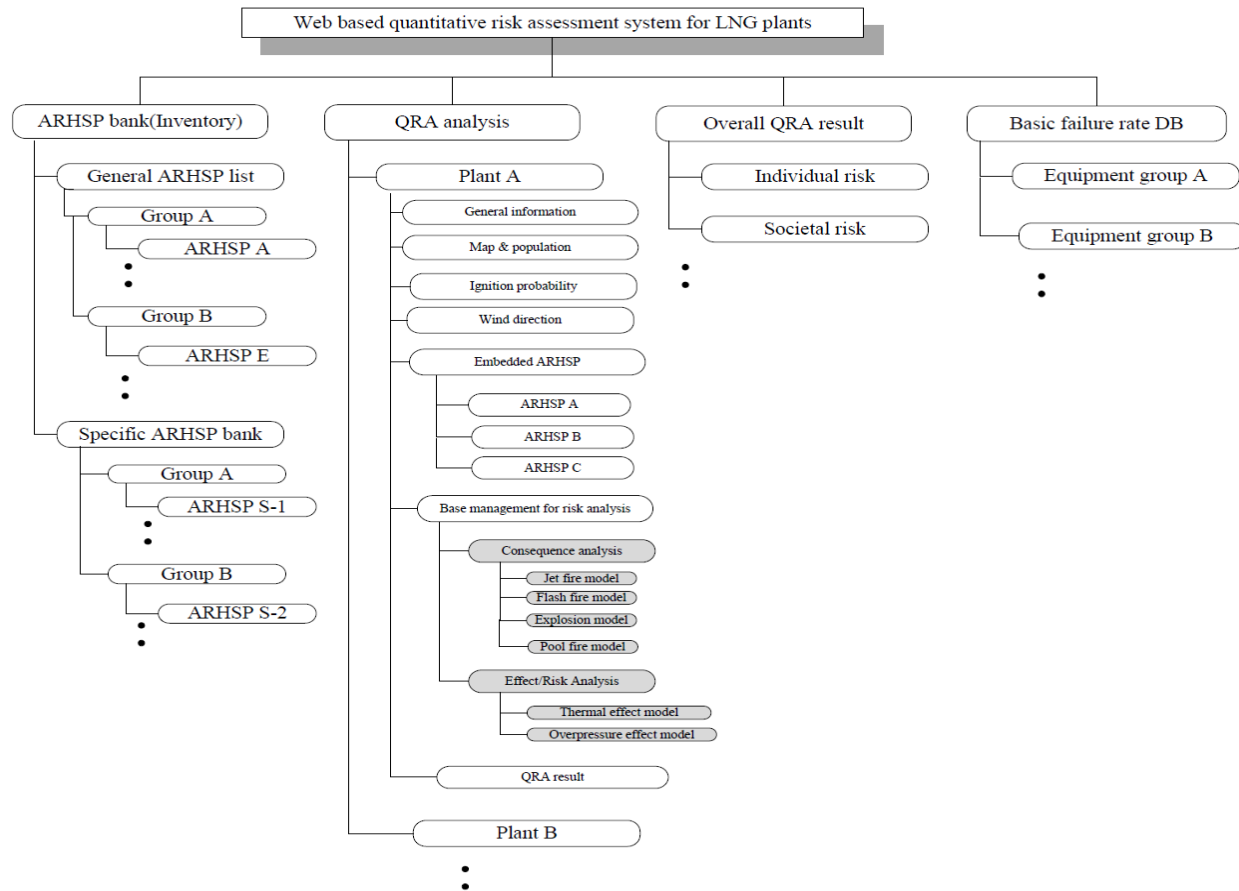


Figure 6-13 웹기반 LNG 플랜트 QRA 시스템 구조 개요도

- ARHSP 작성 및 관리 모듈

Figure 6-14는 6.2.2절에서 분석한 하역설비에 대한 기본 자료를 이용하여 ARHSP를 작성한 화면이다. 생성된 질의에 대한 응답과 기본 고장률을 이용하여 사고경위에 포함된 기본사상의 확률 공식을 기입할 수 있고 구문해석기가 연계되어 있다. 여기서의 기본 고장률은 고장률 데이터베이스로부터 불러들여지거나 수동으로 기입된다. 사고경위 부분에서는 전문가가 지정한 각 누출 사고를 일으키는 기본사상들을 나열함으로서 고려된 사고 개요를 이해할 수 있다. 프로그램 차원에서 사고경위의 기본사상 이름에 위에 마우스가 위치하는 경우 해당 기본사상에 대한 설명구가 보여줌으로서 보다 쉽게 이해할 수 있도록 구성되었다. 최종 누출 사고 시나리오 부분에서는 전문가가 사고결과 분석을 위하여 설정한 누출 시나리오와 그에 해당하는 사고경위 코드를 보여줌으로서 QRA 설정 정보를 최종 점검할 수 있다. 여기서 또한 여러 개의 누출 사고 시나리오를 설정함으로서 위치가 동일한 사고점인 경우 효율적으로 분석 정보를 설정하고 관리할 수 있다.

Figure 6-15는 ARHSP 관리 모듈 화면이다. 보는 바와 같이 일반 ARHSP 모듈과 특정 ARHSP 모듈로 구분되어 있다. 이와 같은 체계를 통해 특정 ARHSP는 계속적으로 발전시켜 유사한 분석에서 활용하여 분석의 효율성을 극대화할 수 있다.

Figure 6-16은 기본 고장률을 관리하는 모듈이다. 여기의 기본 고장률이 ARHSP 내부 기본사상부의 확률식과 연계되어 진다.



ARHSP 기본정보

ARHSP 이름 Unloading ARM Platform

ARHSP 설명

ARHSP 상세설정

운행율의 추가

코드	정의	값	단위	비고	삭제
R1	연간 연로일 변동은 얼마입니까?	50	회		
R2	PERC 의 테스트주기는 얼마입니까?	8760	hr		
R3	LNG PERC 는 몇 개입니까?	4	개수		
R4	하역설비 지역의 4인치 11인치 크기의 LNG 밸브는 몇 개입니까?	3	개수		
R5	하역설비 지역의 12인치 이상 크기의 LNG 밸브는 몇 개입니까?	6	개수		
R6	하역설비 라인의 degassing 시스템에서 LT(level transmitter)의 주기적 점검주기는?	8760	hr		
R7	하역설비 라인의 TSV 는 몇 개입니까?	4	개수		

기본사실 추가

코드	고장률	구성	비고	삭제
#1HYDRA_FF	A: 1.62E-05	A*R10/2	유압설비 고장	
#1PERC_FF	A: 6.3E-07	A*R2/2	포크 고장	
#1ROPE_LOOSE	A: 0.00025	A		
#1UNLOADING	A:	R1		
ARMFREE_ZE	A: 0.00188	A		
D103_EXLR	A: 0.00078	A		
D103_EXMR	A: 0.0039	A		
DBV101_FTC	A: 3.67E-06	A*R11/2		
EDG_UA	A: 0.094	A		
LOIA	A: 0.0031	A		
LOPO	A: 0.067	A		
LT11002_FF	A: 4.77E-07	A*R6/2		
LT11003_FF	A: 4.77E-06	A		

사고경위 추가

코드	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6	비고	삭제
I1	#1UNLOADING	#1ROPE_LOOSE	#1PERC_FF	N_#1PERC	선택안함	선택안함		
I10	UAESD_SPO	R10_UAESD_F	UARV_ZE	TI11004_FF	선택안함	선택안함		
I11	UAESD_SPO	R10_UAESD_F	UARV_ZE	TI11010_FF	선택안함	선택안함		
I12	UAESD_SPO	R10_UAESD_F	UARV_ZE	LT11002_FF	선택안함	선택안함		
I13	#1UNLOADING	#1ROPE_LOOSE	#1HYDRA_FF	선택안함	선택안함	선택안함		
I14	LOIA	R10_IA_F	TSV001_FTO	N_TSV001	선택안함	선택안함		
I15	LOPO	EDG_UA	R10_SP_F	TSV001_FTO	N_TSV001	선택안함		
I16	#1UNLOADING	#1ROPE_LOOSE	DBV101_FTO	N_DBV101	선택안함	선택안함		
I17	N_UA#1LV	UA#1LV_EXMR	선택안함	선택안함	선택안함	선택안함		
I18	N_UA#1MV	UA#1MV_EXMR	선택안함	선택안함	선택안함	선택안함		
I19	M_UA#1LP	UA#1LP_EXMR	선택안함	선택안함	선택안함	선택안함		
I2	UA#1MV_EXLR	N_UA#1MV	선택안함	선택안함	선택안함	선택안함		
I20	UA#1R_HIWIND	선택안함	선택안함	선택안함	선택안함	선택안함		
I21	UA#1R_CRCRASH	선택안함	선택안함	선택안함	선택안함	선택안함		

최종 누출 사고 시나리오 추가

100m 누출

50mm 누출

최대크기누출

시나리오명

100m 누출

관련 사고

I1

I2

I3

I4

I5

I6

I7

I8

I9

I10

I11

I12

I13

I14

I15

I16

선택안함

선택안함

누출크기

100

mm

인원토라

10000

kg

내부온도

-162

°C

누출압력

10

bar

시나리오 설정

실내여부

실내부피

m³

다이크여부

다이크면적

m²

Long피이프 여부

누출형태

Leak

Rupture

Fireball

Poolfire

Jetfire

Flashfire

Explosion

영향모델

Jetfire Ratio

수평

0.5

수직

0.5

Figure 6-14 개발된 ARHSP 작성 모듈

[Home](#) | [Log-off](#) | [My Info](#) | [Admin](#)

BASE QRA SYSTEM
QRA 실행
위험성 평가 현황
ARHSP뱅크
고장률 DB
운영 계시판

**General ARHSP 목록**

- LNG 탱크설비관련
  - LNG Tank
  - 계량실내 ARHSP
- LNG 하역설비관련
  - UnLoading ARM Platform
  - UnLoading ARM Section
  - FSU / FSRU 하역실내 플랫폼
- LNG 고압송출지역

**Specific ARHSP 목록**

- 안전기지
  - UnLoading ARM Platform
  - FSU / FSRU 하역실내 플랫폼
- 항해기지
  - LNG Tank
  - UnLoading ARM Section
  - 계량실내 ARHSP
- 아부다비 기지

**ARHSP 기본정보** 개신

ARHSP 이름: LNG Tank

ARHSP 설명:

**ARHSP 상세설정**

운영질의 추가

코드	설명	값	단위	비고	순서	삭제
R1	LNG 탱크지역에서의 Degassing 밸브는 몇 개입니까	10	개수		↑ ↓	[-]
R2	LNG 탱크지역에서의 Degassing 드럼의 LT에 대한 점검 주기는 얼마입니까	8760	hr		↑ ↓	[-]
R3	LNG 탱크지역에서의 Degassing 드럼의 TE에 대한 점검 주기는 얼마입니까	8760	hr		↑ ↓	[-]
R4	LNG 탱크의 단면적은 얼마입니까	2827	m2		↑ ↓	[-]
R5	LNG 탱크 입입라인의 4인치 11인치 크기의 LNG 밸브는 몇 개입니까	5	개수		↑ ↓	[-]
R6	LNG 탱크 토출라인의 4인치 11인치 크기의 LNG 밸브는 몇 개입니까	5	개수		↑ ↓	[-]
R7	LNG 탱크 토출라인의 12인치 이상 크기의 LNG 밸브는 몇 개입니까	5	개수		↑ ↓	[-]
R8	LNG 탱크 입입라인의 4인치 11인치 크기의 LNG 배관은 몇미터입니까	50	미터		↑ ↓	[-]
R9	LNG 탱크 입입라인의 12인치 크기 이상의 LNG 배관은 몇미터입니까	50	미터		↑ ↓	[-]
R10	LNG 탱크 토출라인의 4인치 11인치 크기의 LNG 배관은 몇미터입니까	50	미터		↑ ↓	[-]

저장 취소

Figure 6-15 ARHSP 관리 모듈

[Home](#) | [Log-off](#) | [My Info](#) | [Admin](#)

BASE QRA SYSTEM
QRA 실행
위험성 평가 현황
ARHSP뱅크
고장률 DB
운영 계시판

**그룹목록**

- 별분
- 기타
- 컨트롤
- 인력오류
- 외부사건
- 배관
- 센서
- 드럼
- 압축기

**별분**

코드	설명	고장률
PERC_FF_B		6.3E-07
LNG_MV_EXLR_B		1.9E-05
LNG_LV_EXLR_B		9.3E-06
LNG_TSV_FTO_B		0.001
DBV_FTO_B		3.67E-06
LNG_LV_EXMR_B		5.9E-05
LNG_MV_EXMR_B		0.0001
PRV_FTO_B		0.0167
LNG_RVM_O_B		1.22E-06
TSV_FTO_B		0.001

Figure 6-16 기본 고장률 관리 모듈

- 분석 모듈

Figure 6-17은 QRA에 필요한 정보, 즉 지도, 인구밀도, 바람 방향 등을 설정하고 선택한 ARHSP에 데이터를 입력하는 모듈 화면이다. 여기서 전문가가 아닌 관련담당자들이 필요한 ARHSP를 선택 위치시키고 질의에 대한 답변을 입력함으로써 QRA에 필요한 모든 정보를 갖출 수 있으며 이것은 사례 1에서 언급한 분업화이다.

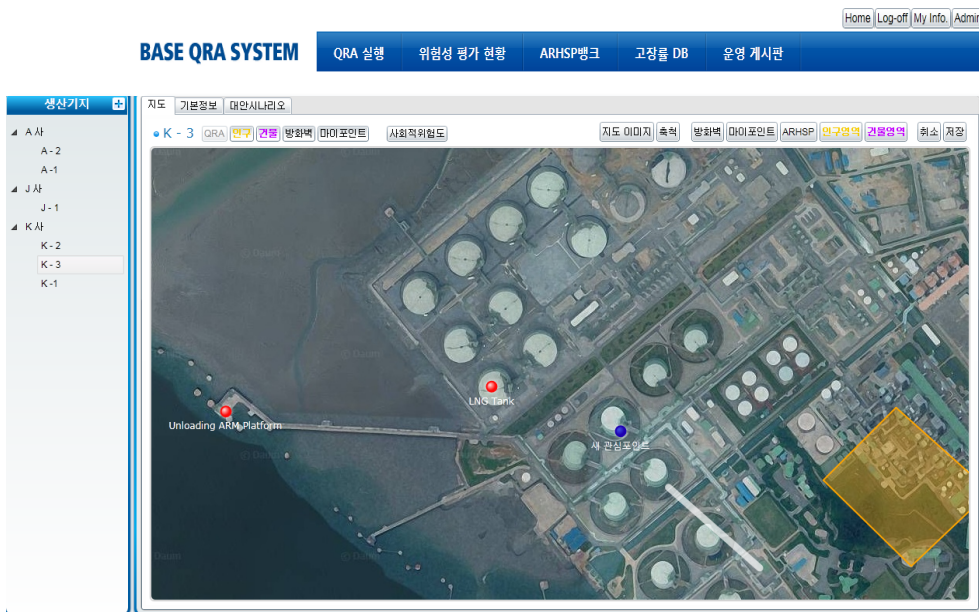


Figure 6-17 ARHSP 배치 및 분석 정보 설정 모듈

Figure 6-18은 ARHSP에 있는 사고결과 분석을 수행한 그 결과를 보는 화면 예시이다. 각 ARHSP를 선택하고 거기에 들어있는 누출 시나리오별 분석자가 선택한 사고 영향 모델별 피해 범위들이 제시된다.

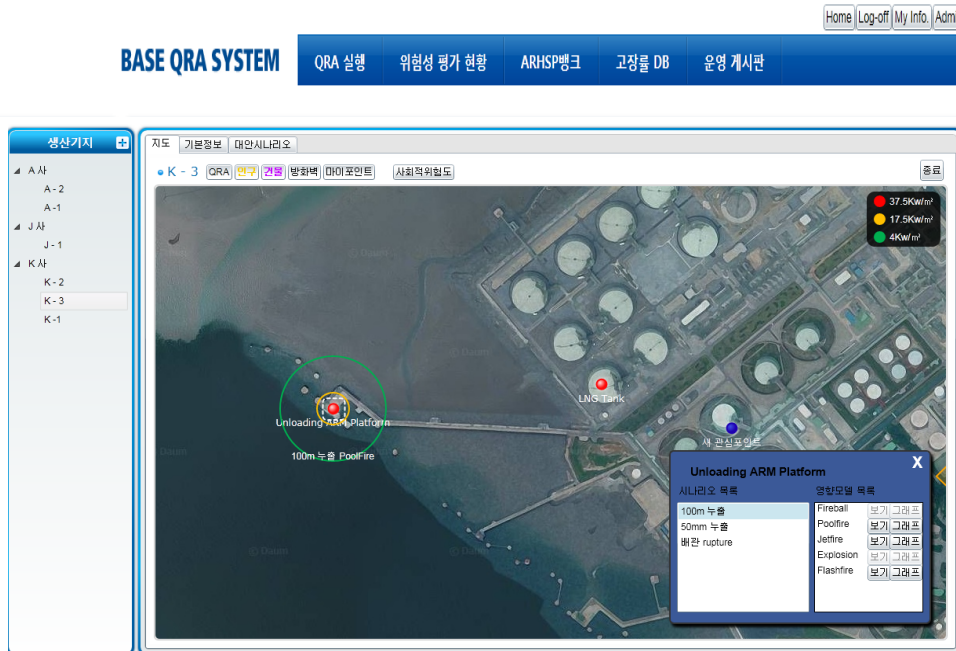


Figure 6-18 사고결과 및 영향 분석 결과 화면 예

Figure 6-19는 하역설비 ARHSP와 하나의 탱크 ARHSP를 작성하고 필요한 데이터를 입력하고 난 후 QRA를 실행한 화면이다. 여기서 각 ARHSP를 중심으로 한 개인적 위험도 곡선이나 총합된 개인적 위험도 곡선을 볼 수 있다. 또한 주변 인구밀도가 설정된 경우 사회적 위험도가 제시된다.

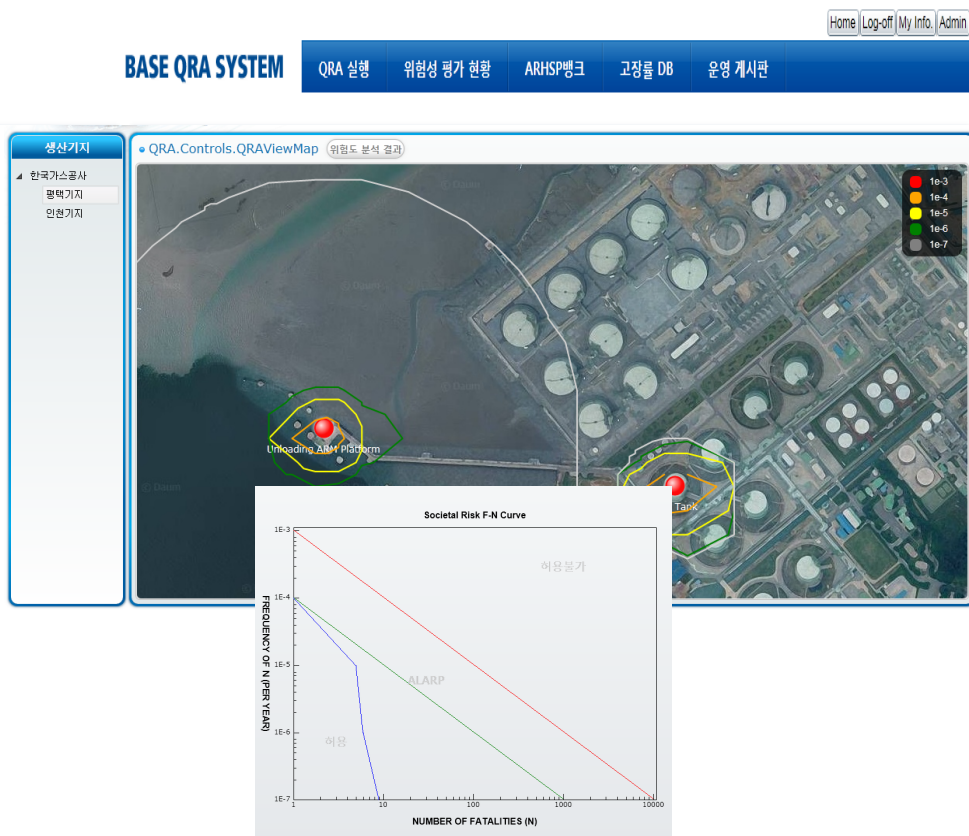
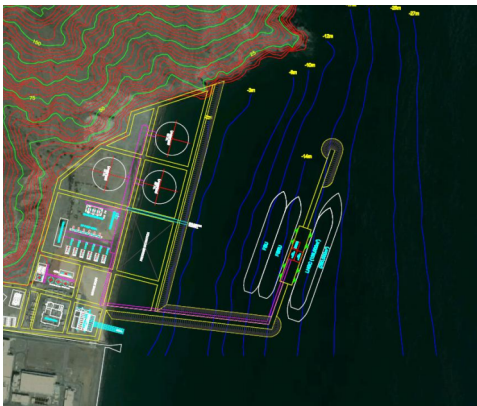


Figure 6-19 정량적 위험도 분석 결과 화면 예

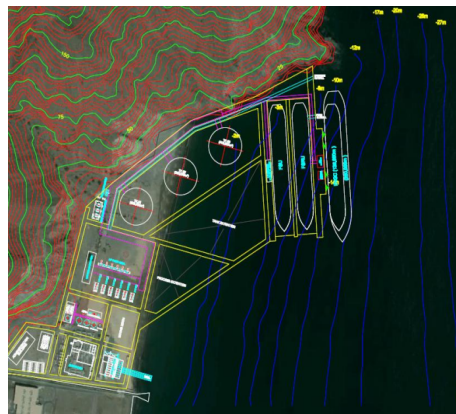
## 6.2.4 활용 및 고찰

ARHSP의 확장성(연속성)을 통한 효율적 QRA 수행이 가능하다는 것을 보이기 위해 실제 중동 국가 아랍에미레이트(UAE)의 M사가 계획하고 있는 FSRU(A Floating LNG storage and regasification unit) 인수기지에 개발한 시스템을 적용해보았다.

적용 당시는 건설 초기 단계로서 Figure 6-19와 같이 2개의 설비 배치안에 대하여 QRA를 수행하는 것이다. 좌측이 1안이며 우측이 2안이다. 6.2.3절에서 작성한 하역설비 ARHSP와 저장설비 ARHSP를 대상의 특성에 맞게 수정하고 질의에 대한 응답을 초기 설계 담당자로부터 얻어 각각의 QRA 분석을 수행해 보았다.



(1안)



(2안)

Figure 6-20 FSRU와 하역설비, 탱크설비 배치 2개안

- 기존 ARHSP 수정 및 분석 결과

실질적으로 M사의 하역설비와 탱크설비의 구성은 한국의 LNG 인수기지의 그것과 큰 차이가 없는 것으로 확인되었고 다만 M 사는 하역설비에 FSRU가 상시 접안하고 있다는 점이 차이다. 따라서 FSRU로 인해 발생할 수 있는 새로운 위험요소는 가스 상태의 고압(약 6 Mpa) 누출이며 이에 대해 FSRU ARHSP를 다시 만들지 않고 기존 하역설비 ARHSP 내부에 관련 시나리오를 추가하였다. FSRU 선상에서 가장 중요하게 평가되는 누출원은 배관 및 밸브로 판단되었고 이를 감안하여 사고빈도와 누출 사고 시나리오를 받기 위한 질의, 기본사상, 사고경위, 누출 시나리오를 추가하였다. 수정된 하역설비 ARHSP와 탱크설비 ARHSP를 배치도에 위치하고 설계자에게 필요한 정보를 요구하여 입력을 완료하였다. 그 결과 Figure 6-21과 Figure 6-22와 같은 개인적 위험도 등고선을 얻었다.



Figure 6-21 1안에 대한 QRA 결과



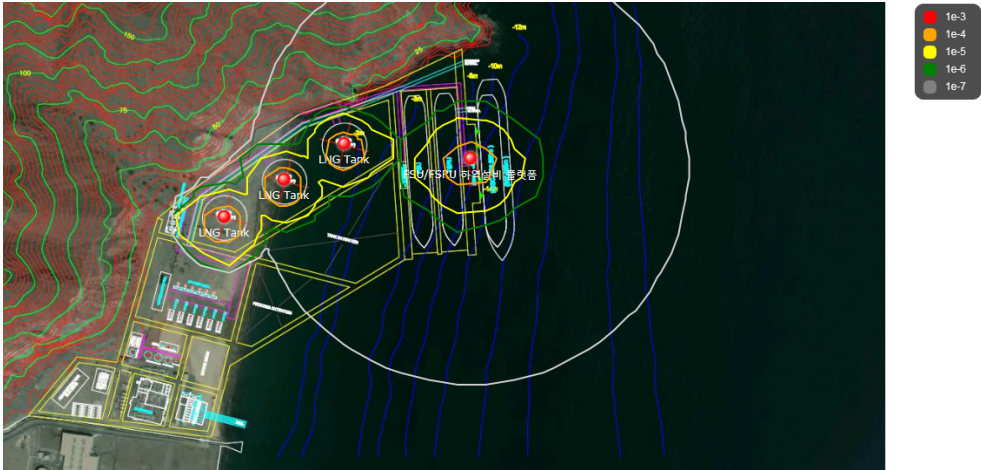


Figure 6-22 2안에 대한 QRA 결과

#### • 토론

위와 같은 분석 과정에서 보았듯이 유사한 설비인 경우에 기 도출된 위험요소는 공유하고 새로운 운전 및 설비 정보에 대해서는 기존 ARHSP를 쉽게 개선하여 편리하게 활용함으로써 효율적 QRA가 가능했다. 즉 ARHSP에 기반한 QRA를 수행하는 경우 그 위험 정보의 효율적, 연속적 개선을 통해 QRA 자체 효율성이 매우 증가함을 명확히 보여주었다.

또한 정보 입력 단계에서 관련자들은 ARHSP 내에 기재된 사고경위 정보를 통해 분석 누출 시나리오 및 사고 개요를 이해한다고 응답함으로써 본 연구에서 주장하는 위험 정보의 검토성도 실현되었음을 보여주었다.



## 7. 결론 및 제안사항

본 연구는 에너지, 화학 공정산업에 대한 위험관리에 있어 최근 그 적용 비율이 급속하게 커지는 정량적 위험성 평가를 보다 효율적으로 실행할 수 있는 새로운 실행 체계와 방법을 제시하였다. 그리고 제안한 방법에 기반한 구체적 QRA 시스템 설계안을 구성하고 이를 실현하였을 뿐만 아니라 실제 산업의 안전관리에 적용함으로서 그 유효성을 보이려고 하였다.

### 7.1 결론 및 기여

20세기 후반 커다란 기술적 발전을 거듭해온 화학 및 에너지 공정산업은 인류에게 편리성과 더불어 사고발생시 지역주민 및 운영자에게 막대한 인명 및 경제적 손실 등의 위험성을 동시에 부가하는 특징을 지니고 있다. 이로 인해 전 세계적으로 각 국가의 규제기관과 기업에서는 위험을 최소화하기 위한 다양한 규제와 규격(코드, 표준)을 생성 적용하고 있는데 그것이 견지하는 공통적 핵심 철학을 살펴보면 관리 주체에게 지속적, 순환적 위험성 평가를 요구함으로서 위험요소를 끊임없이 통제토록 한다는 것이다.

위험성 평가는 크게 2가지로 분류되며 하나는 위험의 확인에 초점을 두는 정성적 평가이고 다른 하나는 확인된 위험요소에 대하여 그 가능성과 결과를 수학적, 확률적 모델로 표현하고 위험도를 산출하는 정량적 평가이다. 정성적 위험 분석 방법론은 공정에 잠재해 있는 무한한 위험요소를 체계적으로 확인하는 데 매우 유효한 방법으로서 이미 산업계에서 깊이

자리 잡았다. 하지만 다양한 위험 물질 특성과 공정 및 관리의 복잡성 등을 고려할 때 정성적 평가만을 이용해 안전에 관한 모든 의사 결정을 하기에는 현실적으로 어려운 부분이 있다. 또한 안전 설비 기술의 발전과 비용의 한계 등 여러 복잡한 상관관계로 인하여 무한 안전만을 추구하는 것도 한계가 있어 결국 정성적 평가 기법은 위험을 확인하는 기법으로 정착되고 최종적인 의사 결정 단계에서는 정량적 위험 분석이 널리 활용되어 가고 있다.

그렇지만 정량적 위험성 평가, 즉 QRA는 분석 이론이 어려워 위험관리 프로세스의 기본 철학인 위험요소 확인 및 평가 등 그 실행 과정에 있어 모든 구성원들의 참여가 실현되지 못하고 있다. 또한 분석 시간이 오래 소요되어 빠른 의사 결정을 요구하는 기업측면에서 위험관리의 도구로 활용하기 어려우며 연속적인 분석을 위한 실행 체계/모델도 제시된 바도 없어 산업 현장에서는 단발적 평가로 이루어지는 경우가 대부분이다.

이에 본 연구에서는 QRA 적용에 있어 이러한 어려움을 극복하기 위하여 3가지 특성, 즉 QRA 지속성, 검토성, 협조성(분업성) 이를 수 있는 방법과 절차들을 제시함으로써 QRA를 활성화하는 기반을 만들고자 하였다. 그러한 발전을 이루기 위해 가장 핵심이라고 판단한 사항은 이해관계자들이 분석에 대한 협력과 위험 분석 모델을 쉽게 이해토록 하는 연계적 중심점이 필요하다는 것이며 그를 위해 ARHSP라고 명명한 정량 위험 분석 정보 구성체를 제안하였다.

제안한 ARHSP는 사고빈도 분석 이론에 기초하여 설계되었고 그 내부 체계는 질의서 부분, 기본사상 부분, 사고경위 부분, 최종 누출 시나리오와 사고빈도 부분으로 구성되어 있다. 이것은 QRA 전문가들뿐만 아니라 모든 이해관련자들이 위험을 이해하는 데 있어 순차적 사고 시나리오 형

식에 익숙한 점을 활용한 것이다. 이러한 구성을 통해 사고결과 분석에 관한 누출원 정보, 사고경위와 기본사건들의 확률식과 기본고장률은 전문가가 설정하고 지리정보, 운영 및 보수 등 관리 정보는 관련자들이 수립하는 체계로 QRA의 분업화(협력화)가 실현되었다.

또한 위험관리에서 QRA를 연속적, 순환적 분석 도구로 두기 위한 ARHSP 기반 정량적 위험관리 프로세스 체계(모델)와 그것을 실현하기 위한 실질적인 시스템 설계안을 고안하고 각 공정생애주기에서 QRA 분석절차를 제시하였다.

그리고 제안한 방법론에 기반하여 본 연구에서는 2개의 사례 연구를 통해 ARHSP에 기반한 QRA 시스템을 구축하고 실제 한국의 가스 산업의 안전관리 업무에 적용함으로써 그 유효성을 보였다.

사례연구1에서는 천연가스 공급 시설에 대한 웹기반의 QRA 시스템을 구축하고 현장의 안전관리자들이 자체적으로 평가를 수행토록 함으로서 ARHSP를 통한 QRA 협력 가능성과 그 효율성을 살펴보았다. 가스 공급 시설에 대한 이해와 사전 위험 분석을 통해 2명의 QRA 전문가가 6개의 ARHSP를 작성하고 QRA 시스템에 내장하였다. 그리고 8명의 안전관리자들에게 QRA 개념과 사용법을 교육하고 4개월에 걸쳐 평가를 수행토록 하였다. 결과적으로 153개소의 가스 시설들에 대하여 전문가와 안전관리자들이 협력하여 10 개월에 걸쳐 QRA를 완료했으며 설비의 유사성과 분석 반복성을 감안하더라도 이것은 매우 획기적인 결과이다. 즉 기존 방법론에 비해 약 60% 분석 시간 감소를 이룬 것으로서 본 논문에서 제안한 QRA 체계가 매우 효과적임을 증명하고 있다. 현실적으로 몇몇 전문가가 백여개가 넘는 대상에 대하여 짧은 시간에 QRA를 완료하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라 고비용의 QRA 여러 전문가를 고용하는 것도 어려운

사안으로서 제안한 방법론이 매우 실용적인 체계임을 증명하였다.

사례연구2에서는 고정형 ARHSP가 아닌 사용이 유연한 ARHSP 기능을 가진 일반화된 QRA 시스템을 구축하였다. 이것은 제안한 위험관리 프로세스 체계와 ARHSP 설계안을 보다 충실히 반영하여 개발한 것으로서 QRA 정보의 검토성과 연속성(응용성)에 관한 유효성을 보이기 위함이다. 이를 위해 일차적으로 LNG 인수기지 설비들에서 가장 중요한 LNG 저장 설비와 하역설비에 대한 위험요소를 분석하고 중요한 사고경위와 누출 시나리오를 설정하였다. 그리고 이를 이용하여 ARHSP를 작성하고 QRA를 효과적으로 수행하였다. 뿐만 아니라 기본 작성된 ARHSP를 이용하여 국외 LNG 인수기지 프로젝트에 활용하였다. 즉 새로운 위험요소와 공정 정보를 반영하여 기존 ARHSP를 수정하고 이를 이용해 QRA를 신속하게 수행하였다. 이로서 제안한 체계가 QRA 정보의 효과적 연속성을 실현하고 이해성을 향상시킴으로서 분석의 효율성을 높인다는 것을 확인하였다.

결론적으로 본 연구는 기존 QRA 수행과정, 즉 위험요소 확인, 모델 수립, 데이터 설정, 위험도 도출 등에 있어서 모든 과정을 전문가에 의존했던 구조를 탈피하여 협력적, 분업적 QRA 체계로 변화할 수 있는 현실적이고 실용적인 패러다임을 보여준 것이다. 또한 위험관리 프로세스에서 가장 중요한 개념인 다양한 이해관계자의 참여를 정량적 평가에서도 가능케 하는 실질적 모델을 제시하고 사례를 보임으로서 QRA 규제 생성 및 활성화 그리고 시스템 발전에 있어 기여를 하였다고 판단한다. 본 논문이 가지는 기여에 대하여 다음과 같이 재정리하였다.

- 안전기관 및 공정산업에서 정량적 위험 분석을 수행하는 데 필요한 시간과 비용을 최소화하고 결과적으로 그것을 활성화하는 데 기여하였다. 기존의 정량적 위험성 평가에서는 전문가가 정보의 수집, 모델의 작성 및

분석, 프로그램 운영 등 모든 것을 수행한다. 하지만 본 논문은 새로운 체계로서 분석 모델의 수립과 분석에 필요한 정보를 얻기 위한 구성은 전문가에게 맡기고 지리정보, 설비의 위치나 관리 정보 등과 같은 정보의 입력은 이해관계자(예, 안전관리자, 설계자 등)에게 배분하는 실용적 협력 체계(모델)를 보임으로서 시간과 인력 등의 제한으로 인해 활성화되지 못하고 있는 QRA를 산업현장에서 보다 쉽게 적용할 수 있는 방법론 개발에 기여하였다.

- 본 논문에서는 기존 정량 위험관리 행태, 즉 문서화된 결과 보고서에 의존하여 피드백이 이루어지는 틀에서 벗어나 분석 초기 단계부터 분석 모델에 대한 의견 수렴과 개선을 손쉽게 이룰 수 있는 체계를 제안함으로써 QRA 실행에 대한 산업계의 저항을 감소시키고 활성화하는 데 기여하였다. 이것은 주요 사고경위에 대한 이해를 바탕으로 관계자들의 참여를 최대화함으로써 불확실성이 제거되고 합의의 분석이 이루어지기 때문이다.

- 새로운 QRA 규제와 표준 개발에 있어 방향성을 제시하고 새로운 통합 QRA 프로그램/시스템 개발에 기여하였다. 기존의 사고결과 분석 방법론에만 집중되어 있는 규제나 코드에서 사고빈도를 총합한 위험도 기반 코드로의 전환시 본 연구에서 제안한 방법론의 기여 가치가 높을 것이다. 이에 대해서는 7.2절에서 보다 상세히 그 방향을 제시해보았다. 또한 향후 이와 관련한 프로그램이 개발되는 경우 본 연구를 통해 개발한 시스템의 구조는 실증적 모델로서 참조되어 그 효과를 발휘할 수 있을 것이다.

- 위험기반 정비/검사 정책 수립 방법론 개발과 관련하여 쉽게 일반화하고 실현화할 수 있는 연구와 기술 개발 활성화에 기여하였다. 그것은

ARHSP 내부에서 정비/검사 정책에 관한 시나리오와 그것과 관련한 정보의 변경, 위험도 변화를 쉽게 관찰하고 측정할 수 있는 기반(틀)이 마련되었기 때문이다.

## 7.2 제안 사항

본 연구의 결과물은 국가 차원에서 QRA를 하나의 기술 기준으로 삼는데 있어 매우 효과적인 체계로 인정받을 수 있다. 한국을 포함한 세계 모든 국가들이 고려해볼 수 있는 방법론이며 이것은 규제 기관과 피 기관의 상호간의 협의 아래 QRA의 규격화를 이루는 기반 체계로서 가치가 있다. 이것은 국가가 규정한 전문가 그룹이 설비/공정 유형별 설정한 누출 물질과 규격화된 ARHSP를 작성하고 이에 대한 공정 및 관리 정보는 피평가 기관이 입력함으로써 결과의 일관성을 이룰 수 있기 때문이다. 더불어 중요한 설비 기본고장률, 누출률과 사고결과 분석 모델은 국가가 지정해 줌으로서 안전성에 대한 최종 판단과 의사 결정에 권위를 더할 수 있다.

이 제안은 QRA의 근본적 원동력은 국가 기관의 규제에 있다는 사실과 현재 QRA 규제 도입 측면에서 다소간 정체기에 있는 상태를 보다 활성화할 수 있다는 판단에서 시작한다. 다만 선결 조건으로 되어야 하는 것은 사고결과 분석과 위험도 산출 프로그램이 있어야 한다. 하지만 이미 이 부분(특히 사고결과 분석 프로그램)에 대한 기존 국내의 여러 연구 결과물이 있으므로 그것을 활용하고 발전시킨다면 전체적인 연구 추진 및 성과 달성에는 문제가 없을 것이다. Figure 7-1은 이러한 제안 사항을 실현하기 위해 단계별 연구 사항을 좀 더 세부적으로 표현한 것이다.

먼저 제안코자 연구는 크게 3가지 방향에서 진행이 되어야 한다. 첫째는 고장률과 누출률 데이터베이스 연구이고 둘째는 석유, 화학 플랜트의 단위 설비별 또는 공정별 표준 ARHSP 작성 연구이며 마지막으로 ARHSP가 작동하는 위험성 평가 프로그램의 개발이다.

위험성 평가 프로그램은 웹 기반이 아닌 스탠드 버전으로 제공이 되어야 한다. 이것은 작성된 표준 ARHSP와 기본고장률은 라이브러리 형태로 제공이 되어야 하고 프로그램은 배포되어야 함을 의미한다. 그 이유는 피검기관에게 정보 입력과 결과 산출에 대해서는 권한과 영역을 주어야하기 때문이다. 여기서 라이브러리는 전문가와 기업체 상호간의 상당한 협의를 거쳐 상호 공감과 이해에 기반을 두고 구축되어야 한다.

협의를 완료 후 사업자들은 제공받은 QRA 프로그램을 이용하여 자신들의 설비 배치도에 관련 공정 및 설비 ARHSP를 삽입하고 데이터를 입력하고 위험도 분석을 수행한다. 분석 모델에 대해서는 이미 다양한 전문가와 엔지니어간의 협의회가 있었으므로 불필요한 논쟁은 사라지고 분석 결과에 대한 토론과 개선책 논의와 같은 발전적 방향으로 전개될 것이다.

위와 같은 연구를 통해 국가 차원에서 QRA 규제의 실행적 타당성을 사업자에게 제시하고 더 나아가 국가의 안전관리에 실질적이고 효과적인 QRA를 적용할 수 있는 세계적 모범 사례를 보여줄 수 있을 것이다. 또한 사업자 측면에서는 제공된 모델을 기반으로 지속적 안전성 향상을 이룰 수 있을 뿐만 아니라 사용된 ARHSP를 개선하고 응용함으로서 위험기반 관리 정책을 효과적으로 적용할 수 있을 것이다.



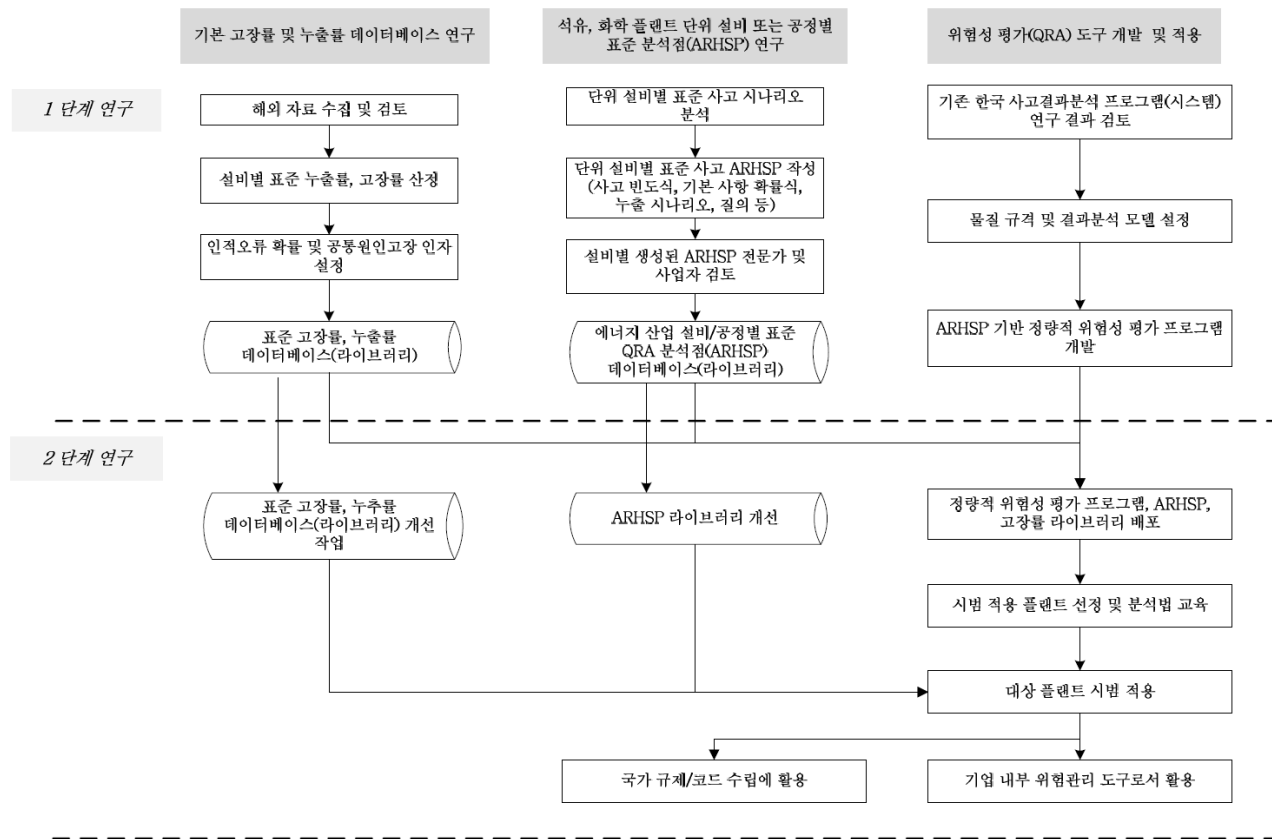


Figure 7-1 제안 연구에 대한 개요

## 참고 문헌

- [1] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **12**, 361 - 378 (1999)
- [2] Eckerman, I.; The Bhopal SAGA Causes and Consequence of the World's Largest Industrial Disaster, pp. 55 - 56, Universities Press (India), Hyderabad, India (2005)
- [3] Paté-Cornell, M. E.; "Learning from the Piper Alpha Accident: A Postmortem Analysis of Technical and Organizational Factors," *Risk Anal.*, **13**, 215 - 223 (1993)
- [4] Lees, F. P.; Loss prevention in process industries, Vols 1, 2 and 3., Butterworths Ltd, London (1996)
- [5] American Institute of Chemical Engineers, 2nd ed.; Guideline for chemical Process Quantitative Risk Analysis, American Institute of Chemical Engineers, New York, (2000)
- [6] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "Risk analysis of a typical chemical industry using ORA procedure," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **14** 43-59 (2001)
- [7] Papazoglou, I. A., L. J. Bellamy, A. R. Hale, O. N. Aneziris, B. J. M. Ale, J. G. Post and J. I. H. Oh;; "I-Risk: development of an integrated technical and management risk methodology for chemical installations," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **16** 575 - 591 (2003)
- [8] Pitblado, R., and R. Turney; Risk Assessment In The Process Industries, 2nd ed., Institution of Chemical Engineer, Warwickshier (2001)
- [9] Center for Chemical Process Safety ed.; Guideline for Developing

Quantitative Safety Risk Criteria, Center for Chemical Process Safety, A John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A (2009)

[10] Kirchsteiger, C.; "Impact of accident precursors on risk estimates from accident databases," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **10**(3), 159 - 67 (1997)

[11] Kirchsteiger, C.; "On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **12**, 399 - 419 (1999)

[12] Bottelberghs, P. H.; "Risk analysis and safety policy developments in the Netherlands," *Journal of Hazardous Materials*, **71**, 59 - 84 (2000)

[13] Gooijera, L., N. Cornilb and C. L. Lenoble; "An international comparison of four quantitative risk assessment approaches – A benchmark study based on a fictitious LPG plant", *ICHEME*, (2011)

[14] Khan, F. I. and M. M. Haddara; "Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **16**, 561 - 73 (2003)

[15] Khan, F. I. and M. M. Haddara; "RBM: risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities," *J Hazard Mater*, **Vol A108**: 147 - 59 (2004)

[16] Arunraj, N. S. and J. Maiti; "Risk-based maintenance – Techniques and applications", *Journal of Hazardous Materials*, **142**, 653-661 (2007)

[17] Chen, L. N. and J. Toyoda; "Maintenance scheduling based on two level hierarchical structure to equalize incremental risk," *IEEE Transactions on Power Systems*, **5**(4), 1510 - 1561 (1990)

[18] Hua, H., G. Cheng, Y. Li and Y. Tang; "Risk-based maintenance strategy and its applications in a petrochemical reforming reaction system," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **22** 392 - 97 (2009)

- [19] American Petroleum Institute ed.; Risk Based Inspection: API Recommended Practice 580, American Petroleum Institute, Washington (2002)
- [20] American Petroleum Institute ed.; API581 : risk-based inspection – base resource document. 1st ed., American Petroleum Institute, Washington (2000)
- [21] Kallena, M. J. and J. M. van Noortwijk; "Optimal maintenance decisions under imperfect inspection," *Reliability Engineering and System Safety*, 90177- 185 (2005)
- [22] International Organization for Standardization; ISO 31000 : Risk management - Principles and guidelines, International Organization for Standardization (2009)
- [23] Muhlbauer, W. K.; Pipeline risk management manual, ideas, techniques, and resources (3rd ed.), New York, Elsevier (2004).
- [24] Arendt, J. S. and D. K. Lorenzo; Evaluating process safety in the chemical industry. A User's Guide to Quantitative Risk Analysis, Center for Chemical Process Safety (2000)
- [25] Demichela, M., N. Piccinini and A. Romano; "Risk analysis as a basis for safety management system," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **17** 179 - 185 (2004)
- [26] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "TORAP Ð a new tool for conducting rapid risk- assessments in petroleum re®neries and petrochemical industries," *Applied Energy*, **65**, 187-211 (2000)
- [27] Lewis, S.; "An Overview of Leading Software Tools for QRA," *American Society of Safety Engineers - Middle East Chapter (161) 7th Professional Development Conference & Exhibition*, (2005)
- [28] Ozog, H.; "Hazard Identification, Analysis and Control," *Chemical Engineering*, 161 (1985)

- [29] Kawka, N. and C. Kirchsteiger; "Technical note on the contribution of sociotechnical factors to accidents notified to MARS," *Journal of Loss Prevention*, **12(1)**, 53-57 (1999)
- [30] Pate-Cornell, M. E. and P. S. Fitchbeck, "PRA as a management tool: organizational tools and risk based priorities for the maintenance of the tiles of the space shuttle orbiter," *Reliability Engineering and System Safety*, **40**, 239-257 (1993)
- [31] Rasmussen, J.; The experience with the major accident reporting system from 1984 to 1993, EUR 16341 EN, JRC, ISPRA (1995)
- [32] American Institute of Chemical Engineers ed.; Guideline for hazard evaluation procedures 3rd ed., AIChE, New York, U.S.A (2008)
- [33] Bailemans, A. W. M.; "Check-list: Guidelines for safe design of process plants," *1st international loss prevention symposium*, New York, U.S.A (1974)
- [34] Kletz, T. A.; "Eliminating Potential Process Hazards," *Chemical Engineering*, 81(4), 48 (1985)
- [35] Knowlton, R. E.; An introduction to hazard and operability studies Vancouver BC, Canada Chemetics International Ltd (1981)
- [36] Kramer, M. A.; "Malfunction Diagnosis Using Quantitative Models with Non-Boolean Reasoning in Expert Systems," *AIChE J.*, 33, 130 (1987)
- [37] Lawley, G.; "Operability studies and hazard analysis," *Chemical Engineering Progress (Loss Prevention)*, **70 (4)**, 45 (1974)
- [38] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "optHAZOP an optimal and effective procedure to conduct HAZOP study," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **10 (3)**, 191 (1997)
- [39] 윤익근, 하종만, 오신규; :가스시설에서의 정성적 인적오류 평가," 한국가스학회 제2권, 제3호 (1998)

- [40] Vesely, W. E., F. F. Goldberg, N. H. Roberts and D. F. Haasl, Fault tree handbook: NUREG-0492, Systems and Reliability Research Office of Nuclear Regulatory Research U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, U.S.A (1981)
- [41] CPR 14E.(1992). Methods for the calculation of physical effects.(2nd ed.). The Hague: Ministry of Social Affairs (issuer) – committee for the Prevention of Disasters.
- [42] CPR 16E.(1992). Methods for the Determination of Possible Damage (Green Book), The Hague: Ministry of Social Affairs (issuer) – committee for the Prevention of Disasters.
- [43] Trbojevic, V. M.; "Risk criteria in EU,", Risk Support Limited, London, U.K.
- [44] Ruppert, K. A.; "The application of the term "Risk" from the viewpoint of the German chemical industry," *Safety Science*, **40**, 127 - 134 (2002)
- [45] Governor's Office of Emergency Services State of California; Risk Management and Prevention Program (RMPP) Guidance, Governor's Office of Emergency Services, (1989)
- [46] Kang, S. J.; "Process safety management for chemical accident prevention," *Proceedings of the OECD Workshop on Human Performance in Chemical Process Safety*, pp.295-311 (1997)
- [47] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "Hazard identification and Ranking (HIRA): a multi-attribute technique for hazard identification," *Process Safety Progress*, **17** (3), 16. (1998)
- [48] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "A criterion for developing credible accident scenarios for risk assessment, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **15**, 467-475 (2002)
- [49] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "Risk analysis: a systematic method

of hazard assessment and control," *Journal of Industrial Pollution Control*, **11(2)**, 89-98 (1995)

[50] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "Simulation of accidents in a chemical process industry using software MAXCRED," *Indian Journal of Chemical Technology*, **3**, 338-344 (1996)

[51] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "Risk analysis of epichlorohydrin manufacturing industry using new computer automated tool MAXCRED," *Journal Loss Prevention in Process Industries*, **10(2)**, 91 (1997)

[52] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "Risk analysis of a chloroalkali industry situated in densely populated area," *Process Safety Progress*, **16(3)**, 172 (1997)

[53] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "Rapid quantitative risk assessment of a petrochemical industry using a new software package MAXCRED," *Journal of Cleaner Production*, **6(1)**, 9-22 (1998)

[54] Popazoglou, I. A., A. Onivoliantiou, and M. Christou; "Probabilistic safety analysis in chemical installation," *Journal of Loss Prevention Process Industries*, **5(3)**, 181-191 (1992)

[55] Suokas, J.; "The role of safety analysis in accident prevention," *Accident Analysis & Prevention*, **20(1)**, 67-85 (1988)

[56] Greenberg, H. R. and B. B. Slater; *Fault Tree and Event Tree Analysis*, Van Nostrand Reinhold, New York (1991)

[57] Uijt de Haag, P. A. M., B. J. M. Ale; *Guidelines for quantitative risk assessment CPR 18E 'Purple book'*, The State Secretary of Housing Spatial Planning and the Environment (VROM) (2005)

[58] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "Analytical simulation and PROFAT II: a new methodology and a computer automated tool for fault tree analysis in chemical process industries," *Journal of Hazardous Materials* **A75**, 1 - 27 (2000)

- [59] Papazoglou, I. A., O. N. Aneziris, J. G. Post and B. J. M. Ale;; " Technical modeling in integrated risk assessment of chemical installations", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **15**, 545 - 554 (2002)
- [60] Mosleh A, Fleming KN, Pickard, Lowe and Garrik Inc.; Procedures for treating common cause failures in safety and reliability studies NUREG/CR 4780, Nuclear Regulatory Commission, Washington DC (1998)
- [61] AEA Technology ed.; Comparative Risk Assessment of LNG Tank Designs, AEA (2004)
- [62] Williams, J. C.; "A data-base method for assessing and reducing human error to improve operational experience," *Proceedings of IEEE 4th Conference on Human Factors in Power Plants* (1988)
- [63] Guttman, H. E.; Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Plant Applications. NUREG/CR-1278, Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C., U.S.A (1983)
- [64] Health and Safety Executive ed.; Reducing risks protecting people HSE's decision-making process, Health and Safety Executive, Norwich, U.K. (2001)
- [65] Denis Kirchhoff, D. and B. Doberstein;; "Pipeline risk assessment and risk acceptance criteria in the State of São Paulo Brazil", *Impact Assessment and Project Appraisal*, **24**, 221 - 234 (2006)
- [66] State of New South Wales through the Department of Planning ed.;; HIPAP 4: Risk Criteria for Land Use Safety Planning (Consulation Draft) July 2008, State of New South Wales through the Department of Planning, Australia (2008)
- [67] Ball, D. J. and P. J. Floyd; Societal Risks, School of Health, Biological & Environmental Science Middlesex University



- [68] Bernatik, A. and M. Libisova; "Loss prevention in heavy industry: risk assessment of large gasholders," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **17**, 271 - 278 (2004)
- [69] Pitblado, R.; "Global process industry initiatives to reduce major accident hazards," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **24**, 57-62 (2011)
- [70] Fairfax, R.; Director of Enforcement Programs OSHA. Testimony to congress: Subcommittee on Oversight and Investigations Committee on Energy and Commerce, (2007)
- [71] Pitblado, R.; "Real-time safety metrics and risk-based operations," *In 11th International symposium loss prevention*, (2004)
- [72] Khan, F. I. and S. A. Abbasi; "MAXCRED: a new software package for rapid risk assessment. Environmental Modeling and Software," **14**, 11 - 25 (1999)
- [73] Korea Occupational Safety and Health Agency ed.; A Collection of 2008 Serious Industrial Accident Cases, pp. 10-12, Korea Occupational Safety and Health Agency, Seoul, Korea (2008)
- [74] Yoon, I. K, J. M. Seo, N. Jang, S. K. Oh, D. Shin and E. S. Yoon; "A Practical Framework for Mandatory Job Safety Analysis Embedded in the Permit-to-Work System and Application to Gas Industry," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 44, No. 12, pp976-988 (2011)
- [75] Marhavilas, P.K., D. Koulouriotis and V. Gemeni; "Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000e2009," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **24**, 477-523 (2011)
- [76] Groen, F. J., S. Carol and M. Ali; "QRAS—the quantitative risk assessment system," *Reliability Engineering and System Safety*, **91** 292 - 304 (2006)

- [77] Reniers, G. L. L., and W. Dullaert; "DomPrevPlanning : User-friendly software for planning domino effects prevention," *Safety Science*, **45** 1060 - 1081 (2007)
- [78] 김구회, 화학공정의 가상 사고 시나리오 합성에 기반한 위험성 평가 시스템, 박사학위논문, 서울대학교 대학원 응용화학부 (2000)
- [79] International Association of Oil and Gas Producers ed., OGP Risk Management-Use and misuse of QRA, <http://info.ogp.org.uk/RiskManagement/Process/Steps/useandmisuseofqra.html>, OGP
- [80] Chung, P. W. H. and M. Jefferson; "The Integration of Accident Databases with Computer Tools in the Chemical Industry," *Comput.Chem.Eng.*, **22**, 729-732 (1998)
- [81] Cullen, T. L.; The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster (the cullen report), Her Majesty's Stationary Office, London, U.K. (1990)
- [82] Energy Information Administration ed.; South Korea Energy Data, Statistics and Analysis --Oil, Gas, Electricity, Coal, <http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips=KS>, EIA (2010)
- [83] National Emergency Management Agency ed.; A Study on the Preparation of a Development Plan for Disaster Management Evaluation System in 2008, pp. 68-70, National Emergency Management Agency, Seoul, Korea (2008)
- [84] Raj, P. K. and L. Theodore; "Risk analysis based LNG facility siting standard in NFPA 59A," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **22** 820 - 829 (2009)
- [85] European Committee on Standardizations ed.; EN 1473. Installation and equipment for liquefied natural gas - Design of onshore installations, European Committee on Standardizations (2006)
- [86] Papadakis, G. A.; "Major Hazard Pipelines: A Comparative Study of Onshore Transmission Accidents", *Journal of Loss Prevention in the Process*

*Industries*, **20**, 91-107 (1999)

[87] 한국가스공사, 공급관리소 설비 신뢰도 분석 및 데이터북, 한국가스공사 (2006)

[88] Health and Safety Executive ed.; Offshore Hydrocarbon Releases Statistics 2001, Health and Safety Executive, Merseyside, U.K. (2002)

[89] 한국원자력연구소 KIRAP(Ver3.3b) (2005)

[90] National Fire Protection Association ed.; NFPA 68 Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting, 2007 Ed., National Fire Protection Association, Massachusetts (2008)

[91] American Institute of Chemical Engineers ed.; Guideline for consequence analysis of chemical release, American Institute of Chemical Engineers, New York, (1999)

[92] 서정철, 화학공정의 안전성 분석을 위한 다중모델 접근 방법, 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (1997)

[93] E&P Forum ed.; Guidelines for the Development and Application of Health, Safety and Environmental Management Systems(Report No. 6.36/210), E&P Forum (1994)

[94] National Fire Protection Association ed.; NFPA 59A. Standard for the production, storage, and handling of liquefied natural gas (LNG) (Edition), National Fire Protection Association, Quincy, MA, U.S.A (2009).

[95] Panel, B.; "BP U.S. refineries independent safety review panel report", pp. 374 (2007)

[96] THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION ed.; COUNCIL DIRECTIVE 96/82/EC of 9 December 1996 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances (1996)

[97] Det Norske Veritas; Software for the Assessment of Flammable, Explosive and Toxic Impact(SAFETI). Version 6.5, Det Norske Veritas

(2006)

[98] Woodruff, J. M; "Consequence and likelihood in risk estimation: A matter of balance in UK health and safety risk assessment practice," *Safety Science*, **43**, 345-353 (2005)

[99] Techno Management Solution Ltd.; Techmas Navi, Techno Management Solution (2009)

## ABSTRACT

The process industries dealing with hazardous materials such as petroleum and gas, chemical have a two-faced characteristic: convenience on one side and risk on the other side in case of an accident. This risk usually brings great potential loss to workers, residents nearby, and the surrounding environment, as historically proven. To reduce the risk, regulations and codes/standards for risk assessment and risk management have been continuously developed and applied worldwide. Its key philosophy is continuous risk control through cyclical risk assessment and execution.

Risk assessment is generally classified into two categories: qualitative assessment that focuses on hazard identification, and quantitative assessment that calculates the probability of the defined risk. Each method has its own role, advantages and disadvantages. Generally, quantitative risk assessment (QRA) is conducted after qualitative risk assessment. The usage of QRA has drastically increased in process industries and safety regulatory agencies recently, because QRA is absolutely necessary for safety decision making when the relationship between safety and productivity gets more complicated due to various restrictions such as construction cost limitations and shortage of land for the plant site due to industrial expansion and increasing population.

However, although various quantitative risk analysis models have been developed for the last 20 years due to this need and to technical trends, and the relevant regulations have been introduced and applied to many countries, there is no management and execution framework

(model) developed to effectively promote quantitative risk analysis in the risk management process, and therefore, it seems that the utilization of quantitative risk analysis has reached its limit.

To overcome the presented situation, this study introduces three objectives to include quantitative risk analysis in risk management, and develops a framework to achieve those objectives. The objectives are cooperation (division of work), reviewability and continuity of the risk analysis. To implement these objectives, ARHSP (Accidental Release Hazard Scenarios Point), an pivotal-centric risk assessment model, was proposed in this study. It is a new method that completes probability analysis by integrating the consequence analysis theory while focusing on the incident sequence, an intermediate product of the quantitative risk analysis process. ARHSP helps the stakeholders' understandings through its basic provision of information on the key events that cause an incident, and it also promotes division of work through its easy probability process for each basic event. Based on this idea, a quantitative risk management process model and a QRA system platform that can advance the risk analysis to the next level by accumulating risk analysis information from the initial design stage to the operation stage were designed, and its QRA analysis procedures were proposed.

In this study, a risk assessment system was developed based on the proposed methodology through case studies, and it was validated through its application to the safety management of actual industries. There are largely two application cases: Case 1 shows the efficient processes of the application of QRA to natural gas supply facilities in the aspect of cooperation and its results; Case 2 verifies the validity of

the proposed methodology for implementing incident scenario reviewability and QRA continuity by establishing a QRA system with functions that can flexibly manage ARHSP and by applying it to LNG facilities.

In conclusion, this study showed the possibility of risk analysis using a cooperative QRA system while no longer depending on the experts for all existing QRA execution processes including hazard identification, model construction, data setting, and risk analysis. In addition, a new paradigm for QRA was established, and it can be easily applied to the government and relevant industry by maximizing QRA efficiency through the collaboration. Also, the establishment of QRA regulations/standards was promoted, and its application systems were further advanced through a proposed practical framework that enables risk knowledge sharing (understanding) - a key philosophy in the risk management process - to be applied even to quantitative assessment. Finally, the QRA system development and application based on suggested methodology greatly contributed to the distribution of risk-based management technology that guarantees the safety of workers and citizens in hazardous industries and makes reasonable decisions and investment plans through QRA.

Keywords: quantitative risk assessment, ARHSP(Accidental Release Hazard Scenario Point), risk management process framework, frequency analysis, consequence and effect analysis